



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**KONEPAJAAN INVESTOITAVAN
AUTOMAATTISEN KONEISTUSSOLUN
DIGITAALINEN KAKSONEN**

Henri Westman

KONETEKNIikka

Diplomityö

Syyskuu 2020

TIIVISTELMÄ

Konepajaan investoitavan automaattisen koneistussolun digitaalinen kaksonen

Henri Westman

Oulun yliopisto, konetekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2020, 52 s. + 2 liitettä

Työn ohjaajat yliopistolla: Porter Jyri, yliopisto-opettaja; Heikkala Jouko, laboratorioinsinööri

Tässä diplomityössä tutkitaan Industry 4.0:n uutta ilmentymää, digital twiniä eli digitaalista kaksosta. Digital twin tarkoittaa fyysisen esineen, prosessin tai toiminnon digitaalista mallia, joka on kytketty fyysiseen kaksoisolentoonsa niin, että fyysisestä maailmasta kerätty mittaustieto ja operatiivinen tieto rikastuttavat digitaalista mallia. Lisäksi työssä tutkitaan teollisuusautomaatiota, koneistuksen automatisointia ja tiedonsiirtoa automaattisessa solussa.

Työn tilaajana toimi Oulun yliopisto. Pää tavoitteena oli suunnitella koneistuskeskuksen sekä teollisuusrobotin sisältävä automaattinen koneistussolu, joka valmistaa vetosauvoja. Lisäksi työn tavoitteena oli tutkia sitä, mitä koneistussolun digital twinin luominen vaatii. Prosessin alkutila oli se, että vetosauvat valmistetaan manuaalisesti. Vetosauvojen valmistusmäärä oli vuositasolla suuri, ja robotisoimalla työstökoneen panostus ja purku tavoiteltiin konepajan henkilöresurssien vapauttamista monotonisen työn sijasta haasteellisempien koneistustöiden suorittamiseen.

Työn tutkimusmenetelmänä käytettiin tapaustutkimusta. Solussa tarvittavat 3D-mallit luotiin Autodesk Inventorilla ja ne tuotiin KUKA.Sim Pro -ohjelmaan robottiohjelmointia varten. Diplomityön tuloksena saatiin robottisimulaatio, teollisuusrobotille siirrettävä robottiohjelma ja ne tekniset ratkaisut, joilla automaattinen koneistussolu kannattaa toteuttaa. Robottiohjelma luotiin käyttämällä kutsuttavia aliohjelmia ja se on myöhemmin muokattavissa helposti myös muiden kappaleiden koneistuksen automatisointiin. Työn tulokset ovat yleistettävissä muihin vastaaviin töihin, joissa suunnitellaan konepalvelun robotisointia.

Asiasanat: teollisuusautomaatio, simulaatio, Digital twin, digitaalinen kaksonen, Industry 4.0

ABSTRACT

The Digital Twin of the Automatic Machining Cell for a Workshop Investment

Henri Westman

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Master's thesis 2020, 52 pp. + 2 Appendixes

Supervisors at the university: Porter Jyri, university teacher; Heikkala Jouko; laboratory engineer

This master's thesis studies a new instance of Industry 4.0, Digital twin. Digital twin is understood as a digital model of physical object, process or operation which is connected to physical twin in order that measured information and operational information from physical world enriches the digital model. In addition, the thesis studies industrial automation, automatization in machining and data transfer in automated cell. Data transfer is an essential part of digital twin.

The thesis was commissioned by University of Oulu. The main objective was designing of automatic machining cell including machine tool and industrial robot which can manufacture tensile strength test specimens. Also, an objective was to study what is required to create the digital twin of the machining cell. Initial condition of process was manual milling of tensile strength test specimens. Annual production quantity of test specimens was high. The target of robotizing loading and unloading of the machine tool was to free machine shop's human resources from monotonic work to perform more challenging milling tasks.

The study method used in the thesis was case study. 3D models needed in the cell were created with Autodesk Inventor and they were exported to KUKA.Sim Pro software for robot programming. As an outcome, robot simulation and transferable robot program was created. Other results of the thesis were technical solutions which are recommended to execute the automatic machining cell. The results are generalizable to other similar tasks, where robotizing of machine tending is desired.

Keywords: industrial automation, simulation, Digital twin, Industry 4.0

ALKUSANAT

Diplomityö kirjoitettiin kesän ja syksyn 2020 aikana. Sen aikana olen oppinut paljon uutta ja olen saanut hyödyntää aiemmassa insinööritutkinnossa sekä yliopisto-opintojen aikana opittuja asioita. Työn päätarkoitus oli suunnitella vetosauvoja valmistava automaattinen koneistussolu ja pohtia sitä, miten datan avulla solusta saadaan tulevaisuudessa luotua digitaalinen kaksonen.

Haluan kiittää Oulun yliopistoa ja yliopiston konepajaa kiinnostavasta diplomityön aiheesta. Haluan myös kiittää työn ohjaajia Jyri Porteria ja Jouko Heikkalaa hyvistä neuvoista ja pohdinnoista työn aikana. Lisäksi kiitos perheelleni tuesta yliopisto-opintojen ja diplomityön suorittamisen aikana.

Oulussa, 18.9.2020

Henri Westman
Henri Westman

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	7
1.1 Tutkimuskysymykset ja työn tavoite	10
2 TEORIA	12
2.1 Teollisuusautomaatio	12
2.1.1 Teollisuusautomaation kehitys	12
2.1.2 Teollisuusrobotit	14
2.2 Digital twin.....	16
2.2.1 Digital twin teollisuudessa.....	17
2.3 Koneistuksen automatisointi	20
2.3.1 Työkalunvalvonta	22
2.3.2 Kiinnittäminen	24
2.3.3 Robotin syöttöjärjestelmät	27
2.3.4 Kappaleen mittatarkkuuden tarkkailu	30
2.3.5 Automaattisen solun ohjaus.....	31
2.3.6 Tiedonsiirto automaattisessa solussa	32
2.4 Teorian synteesi	34
3 NYKY- JA TAVOITETILA	36
4 TULOKSET	38
4.1 Automaattisen koneistussolun tekniset ratkaisut	41
5 YHTEENVETO	45
LÄHDELUETTELO	46

LIITTEET:

Liite 1. Robottiohjelman sekvenssikaavio.

Liite 2. Automaattisen koneistussolun simulaatio.

MERKINNÄT JA LYHENTEET

AR lisätty todellisuus (Augmented Reality)

FMS joustava valmistusjärjestelmä (Flexible Manufacturing System)

Industry 4.0 2010-luvulla alkanut teollisen vallankumouksen uusi vaihe, jossa keskeisinä asioina ovat mm. automaatio, koneoppiminen ja esineiden internet

IoT esineiden internet (Internet of Things) on älylaitteiden verkko, joka siirtää tietoa automaattisesti internetin yli

tekoäly tietokoneiden kyky jäljitellä ihmismieltä esimerkiksi ongelmanratkaisussa ja oppimisessa

VR virtuaalitodellisuus (Virtual Reality)

1 JOHDANTO

Automaation ja robottien käyttö teollisuudessa on yleistynyt maailmanlaajuisesti. Nykyään yhä pienempien sarjojen tuottamiseen on alettu hyödyntämään automaatiota. Voidaan sanoa, että automaation käyttö kotimaisessa tuotannossa alkaa olla elinehto, jotta valmistusta voidaan ylipäättään jatkaa. Teollisen vallankumouksen uuden vaiheen eli Industry 4.0:n myötä koneiden ja laitteiden siirtyminen internetiin on kiihtynyt jatkuvalla tahdilla. Tämä mahdollistaa teollisuuden kehittymisen ja auttaa käsittelemään suuria määriä dataa. Toisaalta tämä vaatii IoT-järjestelmien suunnittelijoilta hyvää ymmärrystä tietoturvan toteuttamisesta, jottei organisaatioiden data päädy väärin käsiin.

Eräs IoT:n ilmentymä on digital twin, jonka eri ulottuvuuksia tutkitaan tässä työssä. Digital twin on fyysisen laitteen digitaalinen vastine, joka sisältää dataa aidosta toimintaympäristöstä ja vastaa oikean laitteen toimintaa. Erilaisia digital twin -teoriamalleja esitellään seuraavassa alaluvussa. Digitaalista kaksosta hyödynnetään laitteiden ymmärtämiseen ja ennustamiseen. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi tuotekehityksessä, tuotantolaitosten suunnittelussa ja kunnossapidossa. Digital twinin ja tekoälyn yhdistäminen voi saada aikaan ratkaisuja, joita ihminen ei keksisi. Kun ymmärretään uuden teknologian mahdollisuudet ja tiedostetaan haittapuolet, digitalisoimalla voidaan saavuttaa kilpailuetua suhteessa kilpailijoihin.

Digital twin on vielä uusi ja paljon kiinnostusta herättävä teknologia, jonka käyttö yleistyy teollisuudessa jatkuvasti. Teknologian kehittyessä digitaalisten kaksosten hyödyntämisen väitetään erottelevan menestyvät yritykset muista (Ismail 2019). Digital twin aiheita sivuavia akateemisia tutkimusprojekteja on Suomessa useita. Gartnerin (2019) mukaan 13 % IoT-projekteja implementoivista yrityksistä käytti vuonna 2019 digital twiniä ja 62 %:lla se on suunnitelmissa. Toisaalta virtuaalijärjestelmien rakentaminen on kallista ja mutkikasta. Sen vuoksi digital twin -teknologia on edennyt tähän mennessä vain erittäin suurten yritysten johdolla (Shaw & Fruhlinger 2019).

Jotta digital twin -konseptin ymmärtää sen koko laajuudessaan, on hyvä tietää konseptin eri teoriamalleista. Näitä teoriamalleja kuvataan työssä seuraavaksi. Mallien sisältö poikkeaa hieman toisistaan riippuen kontekstista, jossa digital twiniä kuvataan. Seuraavaksi esitetyt teoriamallit eivät kata varmasti kaikkia digital twinistä luotuja

malleja, mutta ne ovat malleista yleisimmin esitetyt ja ne tiivistävät digital twinin helposti ymmärrettäväksi.

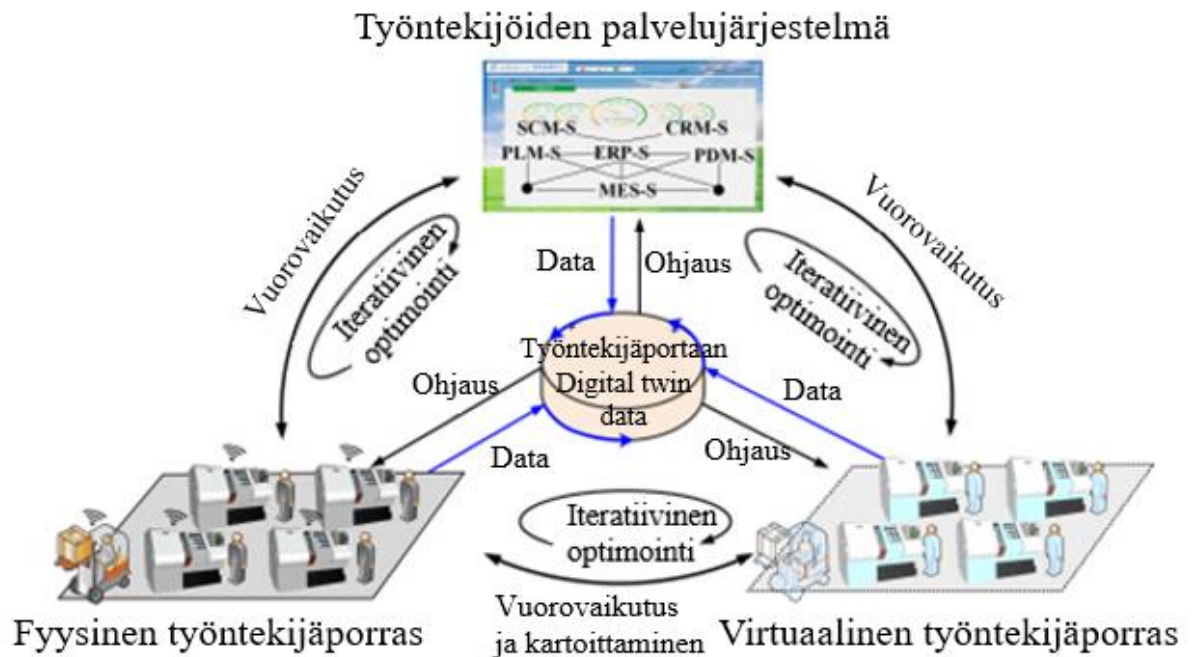
Koska digital twinistä ei ole universaalia yleistä määritelmää, on siitä olemassa lukuisia erilaisia malleja. Näkökulmasta riippumatta teoriamallien peruseriaate on sama. NASA eli Yhdysvaltojen ilmailu- ja avaruushallintavirasto otti digital twinin tunnetusti ensimmäisenä toimijana käyttöön 2010-luvun alussa. NASA käsittää digital twin -konseptin monifysikaalisena laajana simulaationa, jossa käytetään parhaita fysikaalisia malleja, kaluston historiadataa ja todennäköisyyslaskelmia. Näiden tekijöiden avulla digitaalisesta versiosta pyritään tekemään mahdollisimman yhdenmukainen fyysisen version kanssa. Digital twiniin anturidataa saadaan aluksen sisäisestä tietokoneesta, jota täydennetään käyttöhistorialla ja huoltotoimenpiteiden lisäämisellä. NASA tavoittelee digital twinillä operaatioiden onnistumisprosentin nousua, kaluston elinkaaren optimointia, kriittisten vikojen ja valmistuspoikkeamien löytämistä sekä ennalta tunnettujen vikojen välttämistä. Digital twinin tutkiminen ja käyttöönotto yleistyi vasta, kun käsite tuli NASAn avulla yleisesti tunnetuksi. (Heinonen 2019, s. 8; Glaessgen & Stargel 2012, s. 7 - 8)

Viisiosainen digital twin -malli sisältää fyysisen ja digitaalisen osan, niiden yhteyden, datan sekä palvelun. Tästä mallista käytetään lyhennettä DTS, joka tulee englanninkielisestä termistä *Digital Twin Shop-floor*. Fyysinen osa käsittää ihmiset, järjestelmät sekä koneet, ja digitaalinen osa on fyysisen osan virtuaalinen muoto, jossa geometria on huomioitu. Palveluosa on integroitu alusta, jossa laitteistot ja järjestelmät käännetään digitaaliseen muotoon. (Heinonen 2019, s. 9 - 16)

Palveluosa sisältää

- toimitusketjun hallinnan
- toiminnanohjausjärjestelmän
- tuotteen elinkaaren hallinnan
- valmistuksenohjausjärjestelmän
- asiakkuudenhallinnan
- laitoksen hallintajärjestelmän (Heinonen 2019, s. 10).

Mallin keskellä oleva digital twin sisältää muiden osien datan, ennustamisominaisuudet sekä se muodostaa saamansa tiedon avulla digitaalisen osan. Mallin eri osat ovat vuorovaikutuksessa keskenään ja ne synkronoivat tietonsa jatkuvasti. Viisiosaisen digital twin -mallin toimintaa selventää kuva 1. (Heinonen 2019, s. 9 - 16)



KUVA 1. Viisiosaista digital twin -mallia havainnollistava kaavio (mukaillen Tao & Zhang 2017, s. 5).

Vaikka malli on hyvin teoreettinen, Heinonen (2019, s. 17) kertoo mallin hyötyjen olevan ongelmatilanteiden ennaltaehkäiseminen, laadun parantaminen, ennakoiminen, resurssien huomioiminen ja tuotteiden tasainen laatu. Teoriamallin etuna on myös se, että se huomioi käytettävät järjestelmät osaksi digital twiniä ja se keskittyy osien väliseen vuorovaikutukseen.

Mallipohjaisessa digital twin -määritelmässä digitaalista kaksosta hyödynnetään koneoppimisen ympäristönä. Tämän määritelmän kontekstina on tuotantolaitos. Malliin perustuvassa digital twinissä tärkeää on se, että digitaaliset hallintajärjestelmät mallinnetaan mahdollisimman tarkasti konkreettisten hallintajärjestelmien mukaisiksi. Mallia voidaan siten käyttää simuloimaan tuotantolaitoksen eri tarpeita – laitoksen suunnittelu, kehitys ja kouluttaminen. Konseptiin liittyy myös suuresti koneoppimisessa

käytetty vahvistusoppiminen, jossa digital twin pyrkii löytämään datan avulla hyvät toimintatavat ja välttämään huonoja valintoja. (Heinonen 2019, s. 12)

Kuvassa 2 on vedetty yhteen mallien keskeisiä piirteitä. Kun näitä teorianalleja verrataan toisiinsa, havaitaan yhtäläisyys digitaalisen ja todellisen ympäristön käytössä. NASAn digital twin -konseptista havaitaan se, ettei sitä sovelleta teollisuuteen toisin kuin kahta muuta mallia. NASAn konseptissa keskitytään tarkasti ilma-aluksien simuloimiseen ja ongelmien ennakoointiin. Se on muita malleja monifysikaalisempi, mikä johtuu lentämisen ja avaruusympäristön vaativuudesta. Toisaalta kaikissa malleissa on havaittavissa yhteys datan avulla luoduissa simulaatioissa, joilla tavoitellaan ennakoitavuutta ja riskien pienentämistä.

NASA:n luoma digital twin	Viisiosainen digital twin -malli	Mallipohjainen digital twin
<ul style="list-style-type: none"> • Tuotteen elinkaaren tarkastelu ja ongelmien ennakointi • Eri skenaarioiden testaaminen realistisessa digitaalisessa ympäristössä • Laivueen antureihin ja historialliseen dataan perustuva reaaliaikainen todennäköisyyslaskenta 	<ul style="list-style-type: none"> • Eri järjestelmien huomiointi digital twinissä • Resurssien reaaliaikainen tarkastelu • Tuotantokapasiteetin laskeminen tarkasti 	<ul style="list-style-type: none"> • Reaaliaikaisen tilanteen tarkastelu 3D-mallin avulla • Tuotantolaitoksen hallintajärjestelmien simulointi eri tarpeita varten • Autonominen ongelmanratkaisu tekoälyä ja vahvistusoppimista hyödyntäen

KUVA 2. Yhteenveto erilaisista digital twin -teorianalleista (mukaihen Heinonen 2019, s. 20).

1.1 Tutkimuskysymykset ja työn tavoite

Diplomityö tehtiin Oulun yliopiston tilauksesta. Tämän työn päätavoitteena on luoda Oulun yliopiston konepajalle koneistuskeskuksen ja teollisuusrobotin sisältävä automaattinen koneistussolu, joka valmistaa teräksisiä lattamuotoisia vetosauvoja, joiden paksuus vaihtelee välillä 1 - 10 mm. Koneistukseen tulevat vetosauva-aihiot tulevat vesileikattuina. Diplomityön hetkellä robottisolun tulevaa uutta työstökonetta ei ole vielä hankittu. Työn tarkoituksena on selvittää robotin ja koneistussolun muiden osien optimaalinen sijainti solun layoutissa sekä valita solun kannalta kriittiset komponentit.

Toisena tavoitteena on tutkia sitä, mitä koneistussolun digital twinin luominen vaatii. Työn aiheen valintaan vaikuttivat diplomityön tekijän aiempi kokemus robotiikasta ja koneautomaatiosta ja kiinnostus näihin. Työn teoreettisena taustana toimii teollisuusautomaatioon, digitaalisiin kaksosiin sekä koneistuksen automatisointiin tehty kirjallisuuskatsaus. Teoriatiedon hankinnassa on käytetty ajantasaista ja relevanttia kirjallisuutta.

Tutkimuskysymyksiä ovat:

- 1. Mitä asioita on huomioitava, kun suunnitellaan manuaalisen koneistuksen automatisointia?*
- 2. Miten kannattaa luoda automaattisen koneistussolun digital twin?*

Työn alussa kerrotaan teollisuusautomaation kehityksestä ja teollisuusroboteista. Sen jälkeen esitellään digital twin -konsepti ja konseptin sovelluskohteita. Seuraavaksi käydään läpi koneistuksen automatisoinnin teoreettista taustaa. Sitten kuvataan konepajan nyky- ja tavoitetila sekä käydään läpi diplomityön tulokset. Lopussa on pohdittu työn onnistumista ja asioita, jotka vaativat vielä lisäselvitystä.

2 TEORIA

Teollisuusautomaatio on kasvattanut valtavasti valmistettavien tuotteiden määriä ja parantanut tuotteiden laatua. Modernin teollisuusautomaation komponentteja ovat ohjelmoitavat logiikat, moottorit, sylinterit, toimilaitteet, kytkimet ja anturit. Nykyaikana teollisuuslaitteet siirtyvät pikkuhiljaa internetiin ja tuotantojärjestelmistä siirretään isoja määriä dataa analysoitavaksi. Teollisuusautomaation ja tuotantojärjestelmien suunnittelussa voidaan käyttää hyväksi uutta teknologiaa kuten digitaalista kaksosta. Suunnittelussa digitaalisen tuotantojärjestelmän avulla voidaan vähentää turhia hankintoja, suunnitteluvirheitä ja suunnittelu-aikaa (Biesinger et al. 2018, s. 2). Työn teoriaosa kattaa edellä mainittujen teollisuusautomaation ja digital twinin lisäksi automatisoinnin piirteitä koneistuksen viitekehyksessä.

2.1 Teollisuusautomaatio

Teollisuusautomaatio tarkoittaa tietokoneiden käyttämistä koneiden ja prosessien ohjaamisessa. Automaatiota käytetään yleisesti tuottavuuden parantamiseen, vaarallisten työtehtävien välttämiseen, kapasiteetin lisäämiseen sekä miehittämättömien tuotantojaksojen hyödyntämiseen. Seuraavissa luvuissa käsitellään teollisuusautomaation historiaa ja teollisuusautomaation tunnetuinta aluetta – teollisuusrobotiikkaa. (Aaltonen & Torvinen 1997, s. 10)

2.1.1 Teollisuusautomaation kehitys

Automaation tarve lähti kasvuun teollisen vallankumouksen vuoksi 1700–1800-luvun vaihteessa. Ensimmäisiä automaatio-sovelluksia oli ranskalaiskeksijä Joseph Jacquardin 1800-luvun alussa kehittämä kutomakone. Erilaisten kuviokudosten tuottamista ohjasivat reikäkortit. Jacquardin kutomakone nosti tuottavuuden uudelle tasolle, ja koneen reikäkortit vaikuttivat olennaisesti tietokoneohjelmoinnin ja tietokoneiden kehitykseen. (Encyclopedia.com 2020) Dynaamisten järjestelmien tutkimus jatkui pitkään ja vasta 1900-luvun puolivälissä analogista säätötekniikkaa alettiin todella ymmärtämään. (Automaatioväylä 2018, s. 4 - 5)

Sota vauhditti menetelmien ja tekniikan kehittämistä. Haasteet ohjusten, lentokoneiden ja avaruusalusten ohjauksessa vauhdittivat säätötekniikan kehittämistä 1950-luvulta alkaen. Mikroprosessorin keksiminen 1970-luvulla siirsi säätämisen analogia- ja reletekniikoista digitaalitekniikkaan. Digitaali- ja tietotekniikan kehitys mahdollisti historiatiedon keräämisen tietokantoihin, kehittyneiden säätöalgoritmien ja käyttöliittymien toteuttamisen. Lisäksi mikroprosessorit mahdollistivat ohjelmoitavien logiikoiden, robottien ja numeeristen työstökoneiden kehittämisen ja toteuttamisen edullisesti. (Automaatioväylä 2018, s. 5)

CNC-koneita (Computerized Numerical Control) alkoi tulla markkinoille 1970-luvulla ja niiden merkitys teollisuudelle oli käännteentekevä. Valmistusprosessien läpimenoaika lyheni merkittävästi ja laatutaso nousi CNC-koneiden yleistyessä. Kun yksi kone pystyi ohjelmoidusti suorittamaan lukuisia perättäisiä työvaiheita, ei henkilöaikaa tarvittu enää paljon koneen automaattisen toiminnan vuoksi. (Ventä et al. 2018, s. 18) Nykyisten automaatiojärjestelmien toiminnot ja rakenneosat juontavat juurensa 1800-luvun ideoista ja niiden tuotteistamisesta. Automaatiojärjestelmien vaatimat toimilaitteet kuten moottorit ja venttiilit yleistyivät sata vuotta sitten. Anturit ja kytkimet yleistyivät sähköistymisen myötä. (Aaltonen & Torvinen 1997, s. 11 - 12)

Teollisen tuotantoautomaation synnyinsija on Yhdysvaltojen autoteollisuus, jossa otettiin ensimmäisenä käyttöön linjatuotanto ja automatisoidut osien valmistuskoneet. Laitteet olivat toiminnaltaan jäykkiä ja tuotteen muuttuessa asetustyöt ja tuotannon virheetön käynnistäminen veivät viikkoja tai kuukausia. Ensimmäinen jysinkone otettiin käyttöön vuonna 1952 ja ensimmäinen teollisuusrobotti nähtiin 1960-luvun lopulla. FM-järjestelmien käyttö vakiintui 1980-luvulla japanilaisyritysten johdolla. Suomessa FM-järjestelmät ja robotisoinnit vakiinnuttivat asemansa 1990-luvun alussa. (Aaltonen & Torvinen, s. 13 - 14) Lisäksi 1980-luvulla markkinoille tulivat CAD/CAM-suunnitteluohjelmistot, jotka nopeuttivat ja helpottivat tuotteiden suunnittelutyötä huomattavasti. Näihin ohjelmistoihin oli myös mahdollisuus liittää simulointiohjelmia, joilla valmistusta simuloitiin tietokoneella ennen varsinaisen työn aloitusta. (Ventä et al. 2018, s. 18)

Suomeen automaatio saapui vauhdilla 1950-luvun alussa. Tuolloin ei puhuttu automaatiosta, vaan käytettiin termejä säätö- ja mittaustekniikka sekä instrumentointi.

Yhdysvalloissa säätötekniikan soveltaminen prosessien automaatioon oli kehityksen kärjessä, ja Suomi otti sieltä uutta oppia automaatioon. Saatua oppeja hyödynnettiin erityisesti metsäteollisuudessa. Automaation avulla puuduttavia, raskaita ja vaarallisia työtehtäviä on lähdetty automatisoimaan Suomessa ja maailmalla. Tämä on johtanut työtapaturmien vähentymiseen ja tuotannon tehostumiseen. Nykyisin kotimaisessa valmistavassa teollisuudessa riittävän korkea automaatioaste on ehto, jotta valmistus voi jatkua. (Automaatioväylä 2018, s. 6 - 10)

CNC-levytyökeskukset saapuivat markkinoille 1990-luvulla. Tultaessa 2000-luvulle CNC-koneet ovat kehittyneet edelleen. Nykyisin markkinoilla on saatavilla CNC-koneita monenlaisiin tarkoituksiin. Kun robotit alkoivat yleistyä teollisuudessa, niitä alettiin valjastaa CNC-koneiden viereen kappaleenvaihtajaroboteiksi. Niiden avulla voitiin muodostaa täysautomaattisia tuotantosoluja, joita voidaan ajaa miehittämättömänä vuorokauden ympäri. Modernit koneet kykenevät valmistamaan entistä monimutkaisempia tuotteita miehittämättömissä soluissa täysin automaattisesti. (Ventä et al. 2018, s. 19)

Viime vuosikymmeninä keskeinen kehitystrendi on ollut automaatiosovellusten ja -järjestelmien integrointi muihin järjestelmiin. Näitä järjestelmiä ovat muun muassa tuotannonohjauksen, valmistuksenohjauksen ja kunnossapidon järjestelmät. Hallitsevaan asemaan on noussut ohjelmistotekniikka järjestelmien toteuttamisessa ja integroinnissa eri rajapintojen kautta. Nykyisin automaatiojärjestelmien ja sovellusten kehityksen ja ylläpidon hallinta ovat kriittisen tärkeitä prosesseja yrityksille. Ohjelmistojärjestelmät perustuvat nykyään paljon ulkoistettuihin pilvipalveluihin ja pilvilaskentaan. (Automaatioväylä 2018, s. 11)

2.1.2 Teollisuusrobotit

1960-luvun lopulla julkistettiin ensimmäinen teollisuusrobotti ja robottisovellukset siirrettiin laboratorioista tuotantoon 1970-luvulla. Robottien perustana on aina ollut liikkeiden ja käskyjen uudelleenohjelmointi. Teollisuusrobotteja käytetään raskaiden ja vaarallisten töiden suorittamiseen ja niiden tehtäviin kuuluvat muun muassa pinoaminen, lajittelu, maalaus, hitsaus, liimaaminen sekä hionta. Näiden tehtävien lisäksi robotisointi on suhteellisen helppoa muihinkin erilaisiin teollisuuden tehtäviin.

Robotisointipäätökseen liittyy aina sarjakoko, tuotteiden vaativuus ja työstökoneiden joustavuus. Esimerkiksi vaativat toleranssit, haastavat materiaalit ja vaativat muodot ovat haasteellista toteuttaa robottien avulla. Roboteilla ei siis voi korvata osaavaa henkilöstöä. (Aaltonen & Torvinen 1997, s. 13 - 14)

Teollisuusrobottien etuja ovat tuotteiden laadun parantuminen ja tasaantuminen, tuotannon määrän kasvu, yrityksen käyttökustannusten aleneminen, kilpailukyvyyn kasvu, materiaalihukan pieneneminen sekä työturvallisuuden paraneminen. Robottien käytön tavoitteena ei ole korvata työntekijöitä, vaan vapauttaa heidät rutiininomaisista ja raskaista töistä toisiin työtehtäviin. Työntekijät voidaan esimerkiksi kouluttaa käyttämään ja huoltamaan hankittuja robotteja. Teollisuusrobottien haasteita ovat suuret investointikustannukset, yhteensopivuusongelmat eri järjestelmien kanssa ja robottiosaamista omaavien henkilöiden saatavuus. (Tuunanen 2014, s. 7)

Vuonna 2017 teollisuusrobotteja oli käytössä arviolta 2,4 miljoonaa kappaletta (International Federation of Robotics 2019). Eniten teollisuusrobotteja käytetään auto-, elektroniikka-, metalli- ja elintarviketeollisuudessa. Robottien tarkkaa määrää on mahdotonta arvioida, sillä niitä voidaan käyttää vuosia erilaisissa tehtävissä. Usein tilastoissa puhutaan vuosittain käyttöönotetuista roboteista sekä käytössä olevista roboteista suhteessa 10 000 teollisuustyöntekijään. Robotisoinnin kärkimaita ovat tällä hetkellä Kiina, Japani, Korea, Yhdysvallat ja Saksa. (Latokartano 2017)

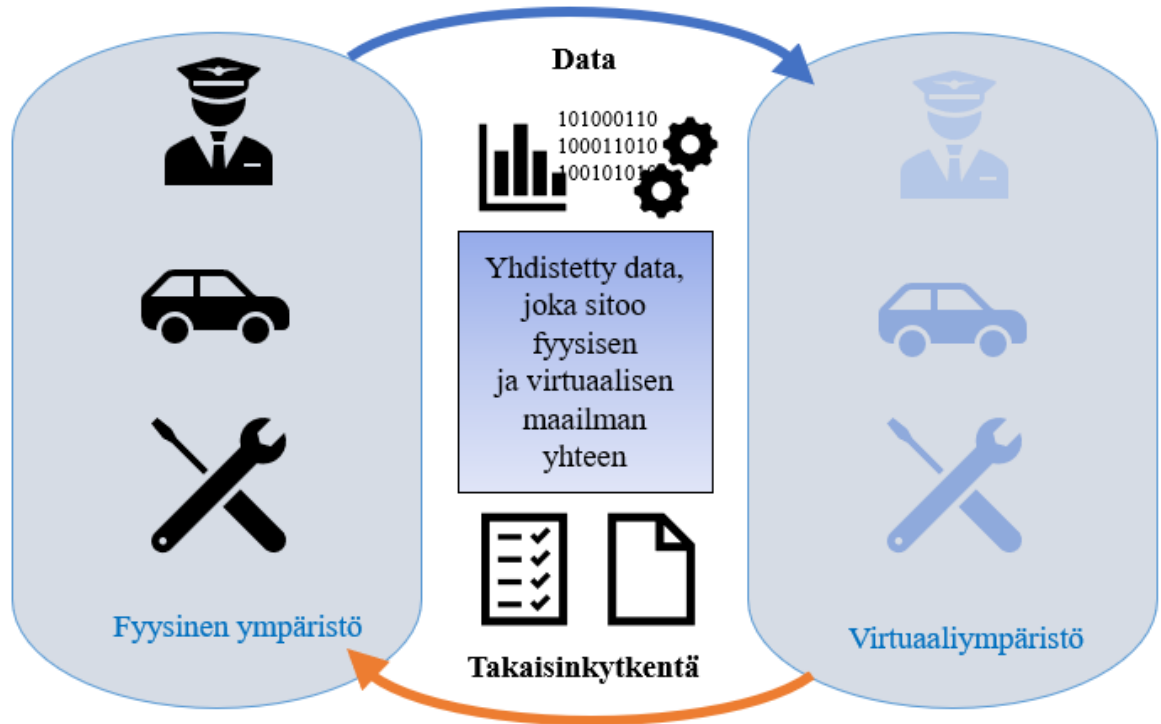
Mitä lähemmäs nykypäivää tullaan, sitä suurempi tarve on saada robotit toimimaan ihmisen kanssa tehokkaasti ja ennen kaikkea turvallisesti. Teollisuudessa on jo käytössä yhteistoiminnallisia robotteja, joissa turvallisuusasiat on suunniteltu niin, että ne voivat toimia yhteistyössä ihmisten kanssa. Suurimpana erona teollisuusrobottien ja yhteistoiminnallisten robottien välillä on se, että teollisuusrobotit ovat yleensä pysyviä laiteratkaisuja ja niitä ei ole suunniteltu siirrettäväksi lyhyen aikajänteen sisällä. Lisäksi yhteistoimintarobotit eivät välttämättä tarvitse ympärilleen suuria turva-aitoja, jos turvallisuus on huomioitu muilla ratkaisuilla. Yhteistoiminnalliset robotit vievät teollisuutta lähemmäs joustavaa automaatiota, sillä ne voidaan siirtää joustavammin työtehtävästä toiseen. Tämän mahdollistavat yhteistoimintarobottien sisäinen voimanhajaus ja -rajoitukset. (Liljamo 2017, s. 12 - 13)

Teollisuusrobotiikassa nousevia trendejä ovat yhteistyörobotiikan lisäksi kehittyneet komponentit, paremmat käyttöliittymät, pilvipalveluiden hyödyntäminen sekä robottiohjelmoinnin helppous. Lisäksi edistykselliset tarttumat eli niin sanotut ”smart grippers” ovat yleistyneet. Arvioidaan, että tulevaisuudessa koneoppiminen yleistyy ja robotit voisivat oppia yrityksen ja erehdyksen kautta. Myös itseoptimointi ja muiden koneiden kanssa kommunikointi prosessien parantamiseksi saattaa olla mahdollista tulevaisuudessa. (Latokartano 2017)

2.2 Digital twin

Perinteisesti CAD-malli on ollut virtuaalinen esitys fyysisestä kokonaisuudesta ja se on mahdollistanut fyysinen ympäristön kuten tuotantojärjestelmän tarkastelun. Digital twin eli digitaalinen kaksonen laajentaa perinteisen 3D-mallin idean konseptiin, joka sisältää myös oikeiden laiteantureiden tuottaman datan. Digital twin hyödyntää usein tekoälyä datan käsittelyssä ja sen avulla voidaan esimerkiksi löytää prosessien optimointiin ratkaisuja, joita ihmiset eivät keksisi. Aiheen esitteli ensimmäisen kerran vuonna 2002 Michael Grieves tuotteen elinkaaren hallinnan esityksessään Michiganin yliopistolla (Grieves 2016).

Lättilän et al. (2017, s. 39) mukaan digital twin on fyysisen esineen, prosessin tai toiminnon digitaalinen malli, joka on kytketty fyysiseen kaksoisolentoonsa niin, että fyysisestä maailmasta kerätty mittaustieto ja operatiivinen tieto rikastuttavat digitaalista mallia (kuva 3). Digital twin ei ole siis simulaatio siitä, mitä ympäristössä pitäisi tapahtua vaan reaaliaikainen malli siitä, mitä ympäristössä tapahtuu, kun parametrejä muutetaan. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi valmistavassa teollisuudessa, tuotekehityksessä, kiinteistöjen hallinnassa, kunnossapidossa, tuotantolaitoksissa ja ilmailuteollisuudessa (Automaatioväylä 2019, s. 14 - 24).



KUVA 3. Digital twin -konsepti.

Digitaalinen kaksonen ei ole välttämättä aina täydellinen 3D-malli todellisesta maailmasta. Konseptin merkitys ja sen käyttöönoton laajuus riippuu aina sovelluskohteesta. Kun digital twiniä luodaan, niin järjestelmän tarkkuus tai resoluutio valitaan niin, että se on minimi, mutta riittävä tietomallin käyttötarkoitukseen. Digital twin -konseptin merkitys ei ole yksiselitteinen, sillä teknologiaa ei ole vielä standardoitu. Konseptista on luotu useita teorialalleja ja niitä on avattu kappaleessa 1.

2.2.1 Digital twin teollisuudessa

Vaikka digital twinistä puhuttiin jo 2000-luvun alussa, sitä ei ole hyödynnetty laajasti kuin vasta viime vuosina. Digital twinin yleistymiseen vaikuttivat NASAn suorittamat tutkimukset ja kokeilut 2010-luvun alussa. Teknologian laajamittainen hyödyntäminen alkoi yleistyä Industry 4.0:n aikakaudella, johon vaikuttivat tekniikan, laskentatehon ja koneoppimisen kehitys sekä antureiden halpeneminen (Lappalainen 2018). Vuonna 2017 digital twin noteerattiin ICT-alan tutkimustalo Gartnerin ”hypekäyrässä” (Gartner 2017). Gartnerin (2019) mukaan 13 % IoT-projekteja implementoivista organisaatioista käytti vuonna 2019 digital twiniä ja 62 %:lla se on suunnitelmassa. Teknologian kehittyessä

digitaalisten kaksosten hyödyntämisen väitetään erottelevan menestyvät yritykset muista (Ismail 2019).

Ulkomaisia digitaalista kaksosta hyödyntäviä yrityksiä ovat mm. Siemens, General Electric, IBM ja Microsoft (Pervilä 2019). Yrityksiä yhdistää se, että digital twin -alustan luomisessa käytetään IoT:n mahdollistamaa datan keräämistä ja pilvipalveluita. Virtuaalijärjestelmien rakentaminen on monimutkaista ja kallista ja siksi digital twin -teknologia on edennyt tähän mennessä erittäin suurten yritysten johdolla (Shaw & Fruhlinger 2019). Digital twin aihetta sivuavia akateemisia tutkimusprojekteja on Suomessa useita. Myös Outokummun Tornion terästehdas investoi kymmeniä miljoonia euroja terästehtaan digitalisoimiseen ja datan uudelleenkäyttöön (Keränen 2019). On siis vahvoja merkkejä siitä, että digital twin tulee tulevaisuudessa yleistymään teollisuudessa.

Kuten aiemmin on mainittu, digital twiniä voidaan hyödyntää esimerkiksi valmistavassa teollisuudessa, kiinteistöjen hallinnassa ja tuotekehityksessä. Sitä voidaan käyttää optimoimaan koko prosessia tai sen osia. Digitaalisten kaksosten suurimpia hyötyjä teollisuudelle ovat teollisuusjärjestelmien hallinta, riskien minimointi, tuotannon hallinnointi ja laadunvarmistus. Tutkimuksen mukaan digitaalisen tehdasmallin käyttö vähensi suunnitteluvirheitä n. 70 % ja suunnittelu-aikaa n. 30 % (Biesinger et al. 2018, s. 2). Tuotantolaitoksen ylösajovaiheessa auttaa se, että järjestelmät on aiemmin integroitu ja simuloitu digitaalisella kaksosella. Näin voidaan selvittää eri vaihtoehtojen toimivuus luotettavasti. Toisaalta ohjelmistojen vaativuuden vuoksi digital twin vaatii suuria investointeja jo ennen fyysisen osan rakentamista. (Heinonen 2019, s. 21 - 22) Jos antureita ja olemassa olevaa dataa halutaan hyödyntää digital twinin luomisessa, on antureiden tai ohjausjärjestelmän oltava IoT:n mukaisia. Vanhat järjestelmät eivät välttämättä tue suurta tiedonsiirtonopeutta ja ole internet-yhteensopivia.

Digital twinin käyttö tuotantolaitosten offline-ohjelmoinnissa on suuri etu. Tuotantolinjastojen ja robottien sammuttaminen ohjelmoinnin ajaksi on erittäin kallista. Esimerkiksi robotista luodun luotettavan digital twinin avulla online-ohjelmointi vie aikaa parhaimmillaan vain ohjelman syöttämisen ja hienosäätöjen verran. Laadukkaiden ohjelmistojen avulla tietokoneella tehty robottisovellus I/O-kytkentöineen voidaan siirtää todelliseen tuotantoympäristöön nopeasti ilman, että häiritään robotin tuotantokäyttöä.

Käytännössä robottien ohjelmointi tehdään pääosin offline-ohjelmointina, ellei sovelluskohde vaadi opettamalla ohjelmointia.

Kunnossapidossa digital twiniä hyödynnetään apuvälineenä. General Electric hyödyntää sitä suihkumoottorien kuormitusten mallintamiseen ja näiden aiheuttamien kulumien kumulatiivisen mallin luomiseen. Kun kyseisien moottorien historiadata ja moottoriyksilön tuottama data yhdistetään, auttaa tekoäly huoltotarpeen ennakkoinnissa. (Montague 2015) Kunnossapidossa digital twin -teknologiaa voidaan hyödyntää myös virtuaalisessa muodossa VR- tai AR-teknologioiden avulla. Esimerkiksi ajoneuvojen huolto-ohjeita voidaan luoda virtuaaliseen tai lisätyn todellisuuden malliin. Tästä huomataan se, ettei digital twin -konseptia voi tiivistää pelkästään yksinkertaiseksi malliksi, sillä se sisältää erilaisia ulottuvuuksia. (Lättilä et al. 2017, s. 30)

Kiinteistöjen hallinnassa digital twiniä voidaan käyttää esimerkiksi hissien kunnan seuraamiseen ja sähkönkulutuksen optimointiin eri kerroksissa. Esimerkiksi hissiyritys Kone käyttää kunnossapitopalveluissaan IBM:n Watson IoT-alustaa (KONE Oyj 2017). Kiinteistöissä voidaan seurata vuotojen aiheuttamia lämpöhäviöitä, säätää valaistusta tarpeen mukaan tai ennakoida laitteiden huoltoa. Jos kiinteistössä ei ole automaatiota, tulee energiahukkaa helposti siitä, että valaistaan ja ilmastoidaan talon ne kerrokset, joissa ei ole ihmisiä. Teknologian hyödyntämisen yleistyessä kiinteistöissä voidaan älykkäällä automaatiolla säästää paljon energiaa ja rahaa. (IBM 2017)

Tuotekehityksessä ja suunnittelussa digitaalisella kaksosella voidaan simuloida erilaisia malleja ja määritellä parhaimmat suunnitteluratkaisut. Digital twin tässä kontekstissa auttaa nopeuttamaan suunnittelua ja säästämään rahaa. fyysisessä prototyypissä esiin tulevat ongelmat saadaan ratkaistua mahdollisimman pitkälle digital twinin avulla. Tämän vuoksi tuotekehityksen prototyypivaihetta saadaan lyhennettyä. Digital twin mahdollistaa myös sen, että suunnittelun ja simuloinnin aikana saatava tieto on käytettävissä myöhemmin laitteen käytön aikana. Tuotekehityksessä digital twinistä saatavat hyödyt riippuvat paljon suunnittelijoiden osaamisesta ja jo olemassa olevan datan määrästä. Kuten on mainittu, suuret yritykset ovat etulyöntiasemassa tämän teknologian käytössä. (Ridal 2019, s. 9)

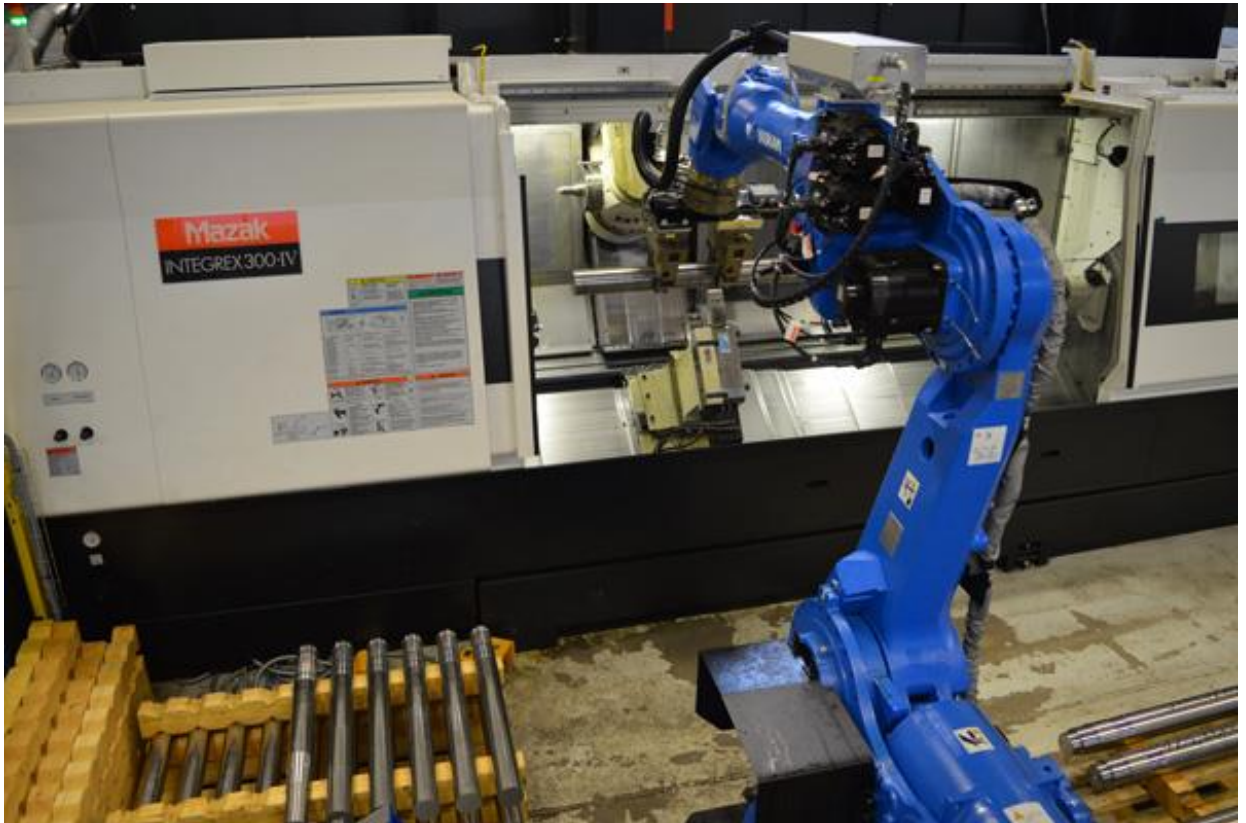
Digital twinien todellinen käyttö vaatii Ismailin (2019) mukaan pitkälle vietyä teknologian integraatiota ja informaation hallintataitoja. Digitaaliselle kaksoselle ei ole mitään valmista ohjenuoraa, ja sen vuoksi teknologian käyttö vaatii räätälöintiä sekä osaamista toimialasta ja tekniikoista. Digital twin -teknologian käyttö riippuu tietysti paljon siitä, missä kontekstissa sitä käytetään. Digital twinin onnistunut toteutus vaatii Makris et al. (2012, s. 3 - 4) mukaan muun muassa seuraavia asioita:

- tarkka 3D-layout tuotantosoluista sisältäen kaikki laitteet
- keskenään yhteensopivat laitteistot ja ohjelmistot
- toimintojen ja signaalien tarkka määrittely, esimerkiksi turvajärjestelmät
- ohjausjärjestelmän ja simulaatiomallin välinen tietoverkko (protokollana usein TCP/IP).

Digital twinin haasteita ovat tietoturva, yksityisyydensuoja, investointien hinta ja tarpeeton monimutkaisuus. Digital twin voi myös vaikeuttaa eri toimintojen integrointia. Tätä voi aiheuttaa se, että digital twin on vielä uusi ja paljon kiinnostusta herättävä teknologia. Teknologiaa suunnittelevan yrityksen on aina mietittävä tapauskohtaisesti se laajuus, millä digitalisaatiota tuodaan yritykseen. Digitaalinen kaksonen voidaan luoda niin pieneksi ja yksinkertaiseksi kun yritys vain tarvitsee. On muistettava myös se, että pelkkä digitalisointi ei ratkaise yrityksen olemassa olevia ongelmia. (Pervilä 2019)

2.3 Koneistuksen automatisointi

Konepalvelussa huolehditaan tuotantokoneen materiaaliarpeista ja valvotaan, että kone toimii oikein. Työvaiheita ovat muun muassa materiaalien lataus ja purku koneeseen, työkappaleen kiinnittäminen sekä valmiiden osien lastaaminen lavalle. Teollisuusrobotit soveltuvat ominaisuuksiltaan hyvin konepalvelun automatisointiin. (Oravasaari 2018, s. 15) Hyödyntämällä robotteja konepalvelussa pystytään pienentämään läpimenoaikoja, nostamaan osien laatua ja parantamaan työturvallisuutta. Konepalvelurobotikkaa käytetään konepajoissa CNC-sorvien, -työstökeskusten ja -leikkauskoneiden, ruiskuvalukoneiden ja särmäyspuristimien konepalvelusovelluksissa. (RobotWorx) Kuvassa 4 on esitetty teollisuusrobotin avulla robotisoitu sorvaussolu.



KUVA 4. Robotisoitu sorvaussolu. (Wihuri Oy Tekninen Kauppa)

Robottisolun suunnittelu on käytännössä ihmisen suorittamien teollisuustöiden analysointia ja niiden kääntämistä robotisoiduksi ratkaisuksi. Ihmisen suorittama manuaalinen työ on harkittua ja systemaattista kykyä suorittaa monimutkaisia tehtäviä sujuvasti ja ennen kaikkea joustavasti. Manuaalisessa työssä nämä tehtävät suoritetaan ihmisen kognitiivisilla ja motorisilla taidoilla. Nämä motoriset taidot muunnetaan robottisolussa antureilla tehtäviksi havainnoiksi, liikkeiksi ja tartuntatoiminnoiksi. (Zhang & Fang 2016, s. 2915) Kun esimerkiksi koneistusprosessia automatisoidaan, on suunniteltava se, miten järjestelmä selviää erilaisista tilanteista kuten terärikko, terän kuluminen tai työkappaleen kiinnittäminen. Automaattisessa toiminnassa virhetilanteet on osattava ennakoida niin, että anturit havaitsevat ne ja järjestelmä osaa muuttaa toimintaansa niiden mukaan.

Konepalvelu sisältää monia piirteitä, jotka tekevät työvaiheen automatisoimisesta kannattavaa. Työympäristö on usein meluisa, työergonomia on huono, työ sisältää runsaasti toistuvia liikkeitä ja käsiteltävät kappaleet ovat usein raskaita. Konepalvelutyössä ihminen voi olla nopeampi kuin robotti, mutta ei kykene robotin

tarkkuuteen. Konepajoissa on pulaa osaavasta työvoimasta, johon apuna voi olla konepalvelun automatisointi. Yksitoikkoiset koneistustyöt voidaan automatisoida, jolloin automatisointi vapauttaa työvoimaa vaativampiin tehtäviin. Ympäri vuorokautisessa tuotannossa työvoimaa voi olla vaikeaa löytää haastavien työaikojen vuoksi. Joustavaan tuotantojärjestelmään (FMS) liitettynä robotti voi työskennellä yön yli yksin niin kauan kuin varastossa riittää työstettävää tavaraa. Lisäksi automatisoidulla konepalvelulla on mahdollisuus parantaa koneen käyttöastetta ja osien laatua. (Oravasaari 2018, s. 18)

Vaikka konepalvelu sopiikin hyvin automatisoitavaksi, siihen liittyy myös haasteita. Konepajoissa on ollut suuntaus kohti pienempiä eräkokoja. Tämä lisää uudelleenohjelmoinnin tarvetta ja vaatii operaattoreilta enemmän robotin käytön osaamista. Työkierrossa haasteita aiheuttavat tavaran joustava tuonti ja poisto robottisolusta, tavaran syötön ja lavalle lastauksen optimointi ja osan poistaminen työstökoneesta. On huomioitava, että osan geometria muuttuu lastuavan työstön aikana, kun osasta poistetaan materiaalia. Tämä voi vaikeuttaa tarttujan suunnittelua ja saattaa vaatia useamman tarttujan käyttämistä. Lisäksi koneen automatisointiprojektin aikana työstökone on poissa tuottavasta käytöstä, ellei automaatisuunnittelussa ja robottiohjelmoinnissa käytetä digitaalisia apuvälineitä. (Oravasaari 2018, s. 19)

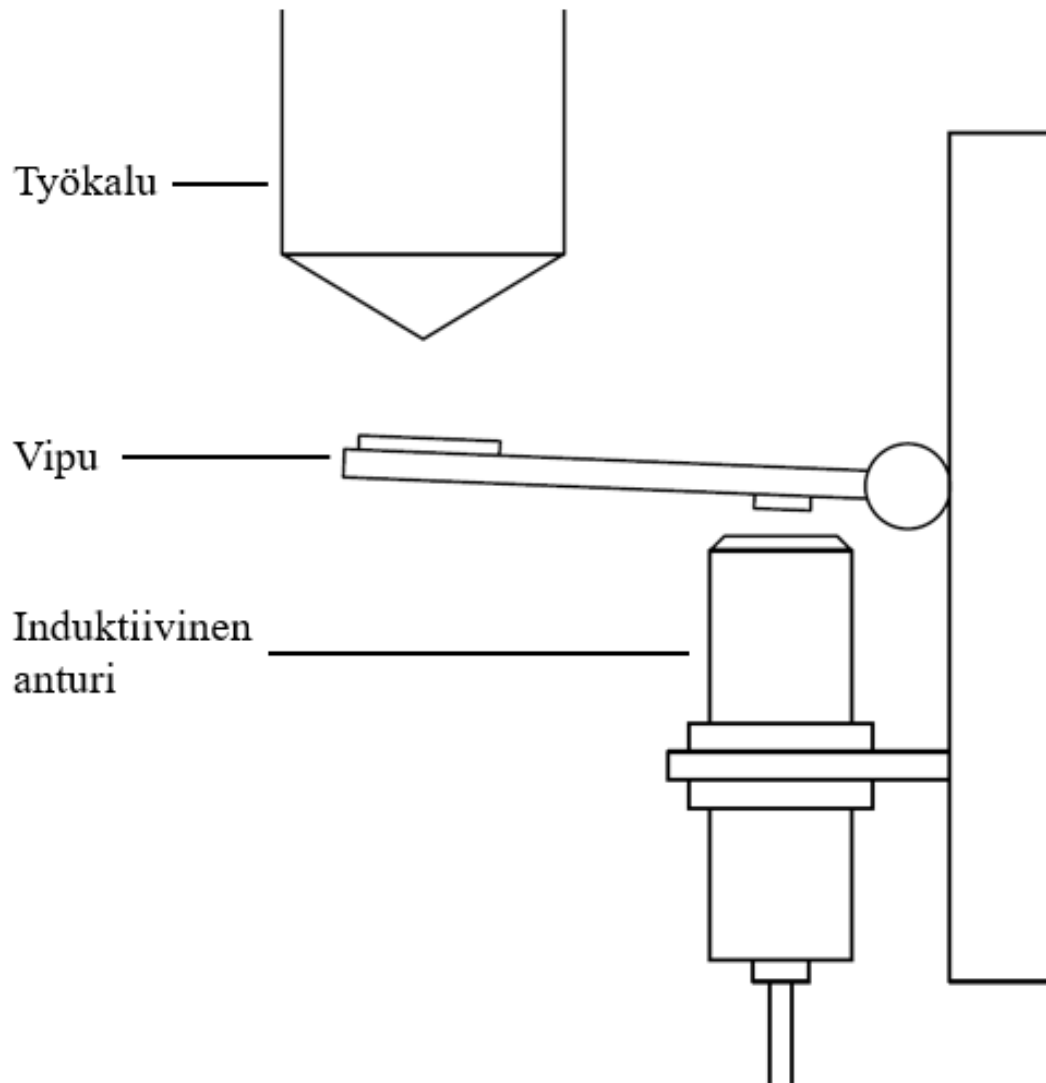
Jos robottisolussa työstetään lukuisia erilaisia osia, on työkappaleissa oltava jotain yhteneväisiä piirteitä, jotta niitä pystytään käsittelemään robotin tarttujilla sekä ilman suuria ohjelmamuutoksia. Vanhoissa automaatisoluissa ei ole ollut tätä ongelmaa, sillä tällöin on puhuttu jäykästä automaatiosta ja samoja osia on valmistettu suurina eräkokoina ilman asetusmuutoksia. (Oravasaari 2018, s. 19)

2.3.1 Työkalunvalvonta

Työkalun kulumisen on väistämätöntä koneistusprosessissa. Sen seuranta on tärkeää, sillä terän kuluessa työkappaleen mittatarkkuus ja pinnanlaatu heikkenee. Terän kuluessa lastuamisvoimat kasvavat ja tehon tarve lisääntyy. (Aaltonen & Ihalainen 1995, s. 142) Työkalun kuntoa valvotaan epäsuorilla tai suorilla mittausmenetelmillä. Epäsuora mittaus tapahtuu työstön aikana keräämällä tietoa lastuamiseen liittyvistä suureista ja suora mittaus suoritetaan työstötaukojen aikana suoraan työkalusta. (Aaltonen & Torvinen 1997, s. 76)

Työstönaikaisessa eli epäsuorassa työkalunvalvonnassa mitattavia lastuamissuureita ovat lastuamisvoima, työstökoneen tehonkulutus, karan vääntömomentti, lastuamisen synnyttämät värähtelyt, akustinen emissio ja työkalun lämpötila. Mitattavan suureen arvo muuttuu työkalun kuluessa. Mitattua arvoa verrataan uuden työkalun vastaavaan arvoon ja näin voidaan päätellä työkalun kunto ja ryhtyä tarvittaviin toimenpiteisiin. Terärikkojen valvontaan sopivat erityisesti tehokulutuksen ja akustisen emissioon mittaukset. Lämpötilan mittaukseen perustuvan valvonnan ongelmana on mittaukseen tarvittavien antureiden sijoittaminen ja menetelmä ei ole siksi yleistynyt tuotantokäyttöön. (Aaltonen & Torvinen 1997, s. 76 - 78)

Suoria työkalunvalvonnan menetelmiä ovat työkalun mittaus ja teräriikon tunnistus. Työkalurikon tunnistuksessa kärjen ehjyys tarkistetaan työstökoneen oman mitta-asteikon ja induktiivisen tai optisen anturin avulla. Yksinkertaistetuissa menetelmissä työkalun kärki ajetaan päin mekaanista vastetta, johon on kiinnitetty induktiivinen anturi. Signaali terän katkeamisesta saadaan, jos vaste ei liiku riittävästi (kuva 5). Työkalun mittaukseen perustuva työkalunvalvonta suoritetaan optisesti tai koneeseen asetetulla mittausanturilla. Työkalu ajetaan akseleiden suunnassa anturia päin ja tällä menetelmällä voidaan todeta terän liiallinen kuluneisuus tai katkeaminen. (Aaltonen & Torvinen 1997, s. 79 - 80)



KUVA 5. Yksinkertaisen työkalurikon tunnistimen periaate. (mukaillen Aaltonen & Torvinen 1997, s. 80)

2.3.2 Kiinnittäminen

Kun koneistetaan yksittäisellä työstökoneella, tarkoittaa se käytännössä sitä, että kappaleet vaihdetaan suoraan työstökoneelle. Kappaleen kiinnitys rakennetaan tällöin usein mekaanisilla kiinnittimillä. Kappalevariaatio voi olla todella kirjava ja tuotantoa ei ole tällöin suunniteltu sarjatuotantoon. Automaatiota pyritään lisäämään, kun tuotanto siirtyy sarjatuotannon puolelle. Kappaleiden ollessa pyörähdysymmetrisiä sorvattavia kappaleita, on kappaleiden kiinnitys yksinkertaisinta kolmieleukaistukalla. Kappaleen kiinnitys voidaan tällöin automatisoida käyttämällä hydraulista istukkaa, joka on lähes kaikissa NC-sorveissa. Jyrsinkoneissa kappaleet ovat monimuotoisempia ja niiden

kiinnittäminen automaattisesti vaatii erityiset hydrauliset kiinnittimet. Niiden käyttäminen vaatii enemmän suunnittelua ja siten myös rahaa. Sarjojen ollessa suuria, voidaan investointikustannukset saada takaisin automaation aikaansaamilla säästöillä. On huomattava, että sorvin tai jyrsinkoneen tapauksessa tuotannolla ei ole joustavuutta, sillä tuotteen vaihtaminen vaatii asetusten muuttamista. Asetusten muuttaminen vie aikaa ja työstökone ei ole silloin tuottavassa käytössä. (Reunanen 2011, s. 28)

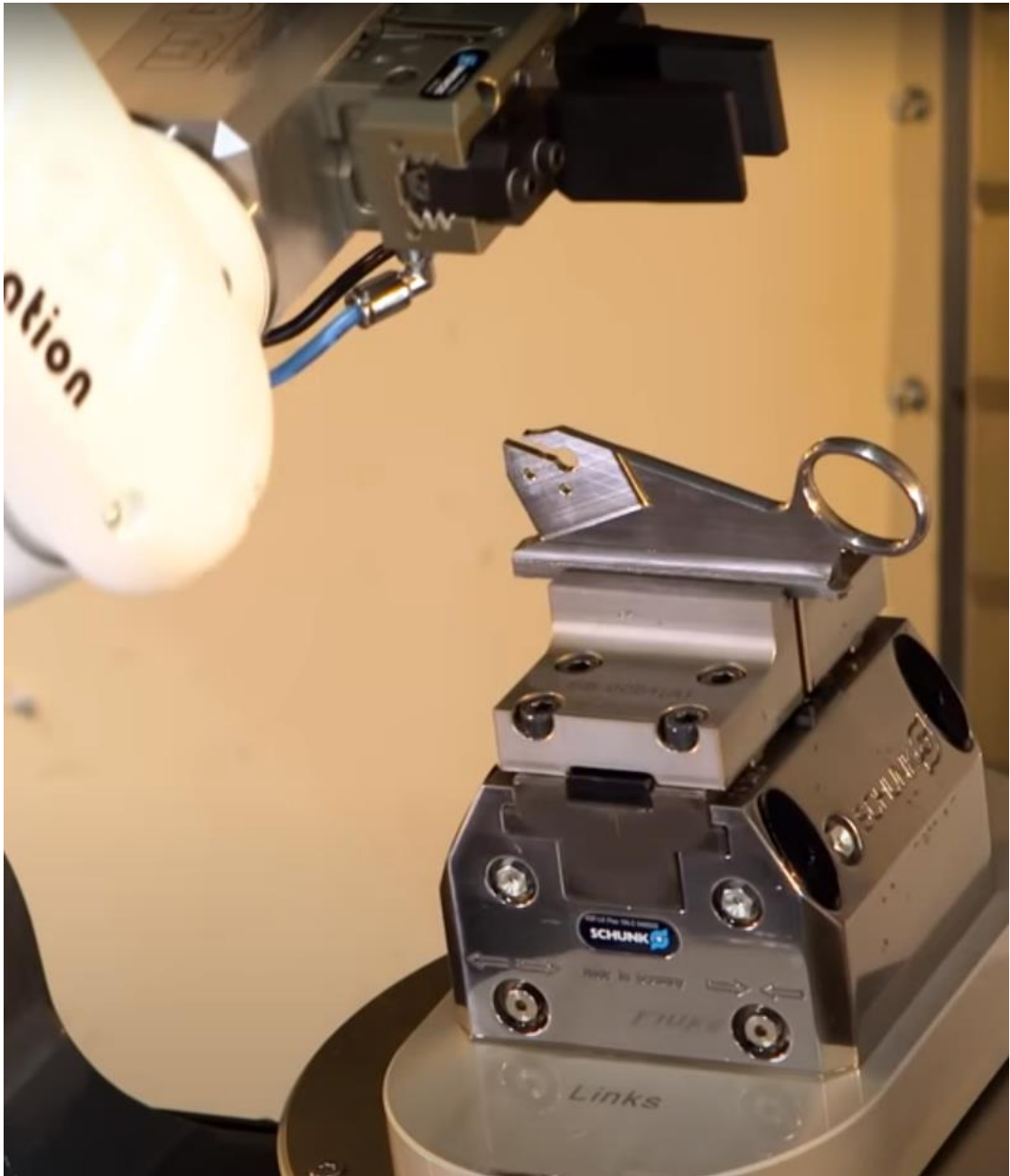
Kun tuotantoon halutaan automaation lisäksi joustavuutta, tarvitaan joustavia ratkaisuja tarjoava järjestelmä kuten FM-järjestelmä. FM-järjestelmässä kappaleiden kiinnitykset rakennetaan konepaletteille. Näitä konepaletteja vaihdetaan automaattisesti työstökoneeseen, jossa on useita paletteja. Tällöin kyseessä on työstökoneeseen integroitu paletinvaihtojärjestelmä. Vaihtoehtoisesti työstökone voidaan kytkeä laajempaan FM-järjestelmään, missä on erillinen palettivarasto ja kuljetinjärjestelmä, millä paletit kuljetetaan varastoon ja työstökoneelle. Sorvit voivat olla FM-järjestelmän osana sillä edellytyksellä, että sorvin kiinnitin on mahdollista vaihtaa automaattisesti. (Reunanen 2011, s. 28)

Joustavan valmistusjärjestelmän rakentaminen vaatii suuren investoinnin, ja siksi sen suurimman käyttäjäryhmän muodostavat yritykset, jotka tekevät sarjatuotantoa toistuvasti. FM-järjestelmässä myös yhden tuotteen valmistusprosessin rakentaminen vaatii resursseja ja investointia. Jotta järjestelmän joustavuus säilyy, tuotteelle pyritään rakentamaan valmiit asetukset omalle paletille. Järjestelmässä on useita tuotteita ja tällöin tarvitaan myös paljon paletteja. Yhden paletin valmistuskustannukset voivat nousta jopa 10 000 euroon. Miehitämätön tuotanto toimii vain niin pitkään kuin valmiiksi ladattuja paletteja on tuotantojärjestelmässä. (Reunanen 2011, s. 28)

Miehitämätön tuotanto mahdollisimman pienillä kustannuksilla voidaan saavuttaa käyttämällä robottipanostusta nollapiste-elementtien avulla. Koneistusta varten kappaleille rakennetaan kiinnittimet, joihin ne kiinnitetään työstön ajaksi. Yksinkertaisimmillaan tämä voidaan toteuttaa yhdelle kappaleelle käyttämällä manipulaattoria ja esimerkiksi hydraulista kiinnitintä. Tämä järjestelmä ei sisällä kuitenkaan joustavuutta. FM-järjestelmissä kappaleiden kiinnitykset rakennetaan valmiiksi konepaletteille. Konepalettien kiinnityksessä työstökoneeseen voidaan hyödyntää esimerkiksi nollapistekiinnitystä, jolloin asemoitavan kappaleen nollapiste

säilyy jokaisella kiinnityskerralla samassa paikassa. Helpon kiinnityksen vuoksi nollapistekiinnitys soveltuu hyvin automatisoituun tuotantoon. (Reunanen 2011, s. 29 - 33)

Koneistuksessa kiinnittimen ja työkappaleen pinnalle jää lastuamisnestettä ja lastuja. Lastut voivat jäädä automaattisessa solussa kiinnittimen leukoihin, jolloin työkappaleet eivät kiinnity tarkasti. Pahimmassa tapauksessa työkappale irtoa koneistuksen aikana kiinnittimen leukojen ja työkappaleen välissä olevien lastujen vuoksi, koska kiinnitysvoima ei kasva vaaditulle tasolle. Automaattisessa toiminnassa lastut poistetaan koneistuksen jälkeen robottikäsiarten asennettavalla paineilmatyökalulla (kuva 6), työstökoneen karan läpi paineilmalla tai voimakkaalla lastuamisnestesuihkulla (Lamarre 2010). Lastujen poistaminen voidaan suorittaa koneistuksen jälkeen, ennen uuden aihion kiinnittämistä tai vaihtoehtoisesti molemmissa vaiheissa. Edellytyksenä lastujen poistolle on se, että lastunhallinta on kunnossa ja lastut katkeavat lyhyinä. Lastujen irtoaminen pitkänä nauhana aiheuttaa ongelmia. (Felix 2007)



KUVA 6. Lastujen poistaminen kiinnittimestä robotin paineilmatyökalun avulla. (KUKA - Robots & Automation 2016)

2.3.3 Robotin syöttöjärjestelmät

Työkappaleita voidaan Felixin (2007) mukaan siirtää ja käsitellä robottisolussa tangonsyöttölaitteella, kuljettimella, päällekkäisillä paleteilla, erilaisilla makasiineilla tai vetolaatikkoyksiköillä (kuva 7). Edellä mainituista järjestelmistä tangonsyöttölaitetta voidaan käyttää vain sorveissa. Robotin syöttöjärjestelmän tehtävänä on pitää huoli siitä,

että robotti saa tarvitsemansa kappaleet. Tyypillisesti syötettävien kappaleiden on oltava oikein päin ja oikeassa asennossa, jotta robotti osaa poimia ne. Kappaleiden ollessa syöttöjärjestelmässä satunnaisessa järjestyksessä ja asennoissa tarvitaan konenäköä kappaleiden poimimiseen. (Valonen 2012, s. 13)



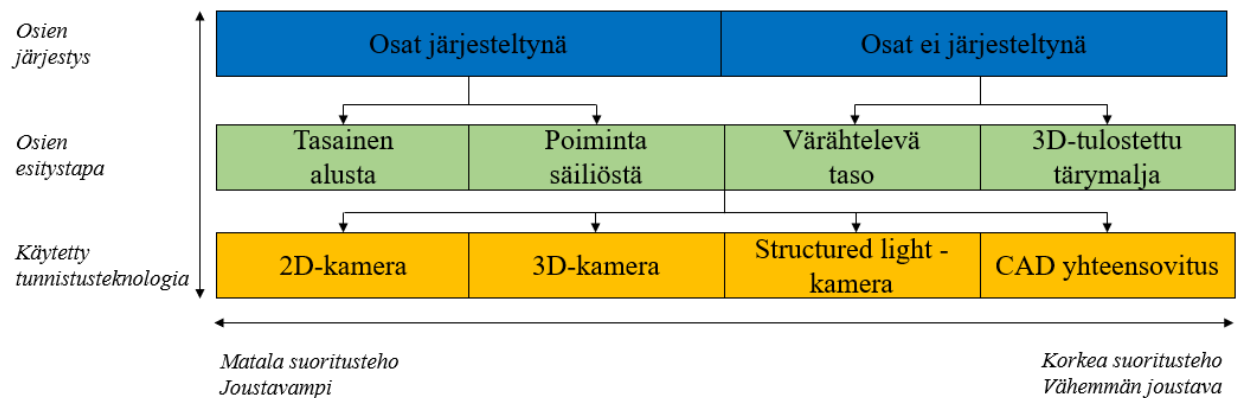
KUVA 7. Erilaisia robotin syöttöjärjestelmiä. (Mitsubishi Electric Germany 2020; Probst 2014; RNA Automation 2020)

Yksinkertaisin syöttöjärjestelmä on makasiini. Niissä osat on järjestelty aina samaan paikkaan ja asentoon. Tyypillisimpiä makasiineja ovat paletit ja pystymakasiinit. Makasiinit ovat toimiva ratkaisu helposti toisiinsa juuttuvien osien jakamiseksi. Muita makasiinien etuja ovat yksinkertaisuus, pienet valmistuskustannukset, varmatoimisuus sekä helppokäyttöisyys. Haittapuolena on se, että ne vaativat manuaalisesti suoritettavaa täyttöä. Makasiinin suunnittelussa tulee ottaa huomioon sen helppo ladattavuus. Makasiinin täyttö on myös mahdollista suorittaa robotilla. (Valonen 2012, s. 13; Javanmiri 2011, s. 20 - 21)

Toinen yleinen syöttöjärjestelmä on värähtelevä makasiini eli tärymalja. Tärymaljat soveltuvat erityisesti pienien kappaleiden käsittelyyn. Toimintaperiaate on se, että kappaleet asetetaan värisevään rumpuun, joka saa kappaleet liikkumaan eteenpäin. Kappaleet kulkeutuvat rummista haluttuun paikkaan usein ympyränmuotoista kourua pitkin. Kouru sisältää esteitä, jotka kääntävät kappaleen oikeinpäin sen edetessä kourussa. Näin kappaleet ovat tärymaljan lopussa aina samassa asennossa. (Valonen 2012, s. 13) Malik et al. (2019, s. 3) mukaan tärymaljojen haittapuoli on niiden vaatima suuri tilantarve sekä meluisuus.

Kehittyneemmissä syöttöjärjestelmissä käytetään kappaleiden syöttämisessä ja tunnistamisessa konenäköjärjestelmää (Felix 2007). Tällainen järjestelmä mahdollistaa sen, että osat voidaan tuoda robotille satunnaisessa järjestyksessä. Tämän syöttötavan ongelmia ovat osien saavutettavuus sekä päällekkäisyys. Vaikka syötettävät osat ovat satunnaisessa järjestyksessä, on niiden oltava sellaisessa asennossa, jossa robotin tarttujan on mahdollista tarttua osaan. Tämä tarkoittaa myös sitä, että osien vieressä on oltava riittävästi tilaa tarttujalle. Osien päällekkäisyys automaattisessa syöttöjärjestelmässä on ongelma, sillä päällekkäisten osien paikantaminen on vaikeaa. Ongelmia järjestelmään aiheuttaa myös se, jos käsiteltävien osien sekaan joutuu odottamattomia osia. (Malik et al. 2019, s. 3)

Robotin tarvitsemat osat voidaan tuoda konenäköä sisältäviin syöttöjärjestelmään tasaisella pinnalla, säiliössä, värähtelevällä tasolla tai tärymaljalla (kuva 8). Myös kuljetinta voidaan käyttää. 2D-kameroita käytetään tunnistamaan osia, jotka ovat samalla korkeudella. 3D-kameralla ja structured light -kameralla saadaan tieto myös osien korkeudesta. 2D- ja 3D-kameroiden käyttöä voidaan tukea CAD-geometriaa tunnistavalla tekniikalla. Siinä konenäköjärjestelmä vertaa kameralla kuvattua osaa CAD-malleihin ja syöttöjärjestelmä voi näin ollen käsitellä erilaisia osia esimerkiksi robotilla suoritettavassa kokoonpanossa. (Malik et al. 2019, s. 5 - 6)



KUVA 8. Konenäköön perustuvat kappaleen syöttötekniikat jaoteltuna joustavuuden ja suoritustehon mukaan. (mukaillen Malik et al. 2019, s. 5)

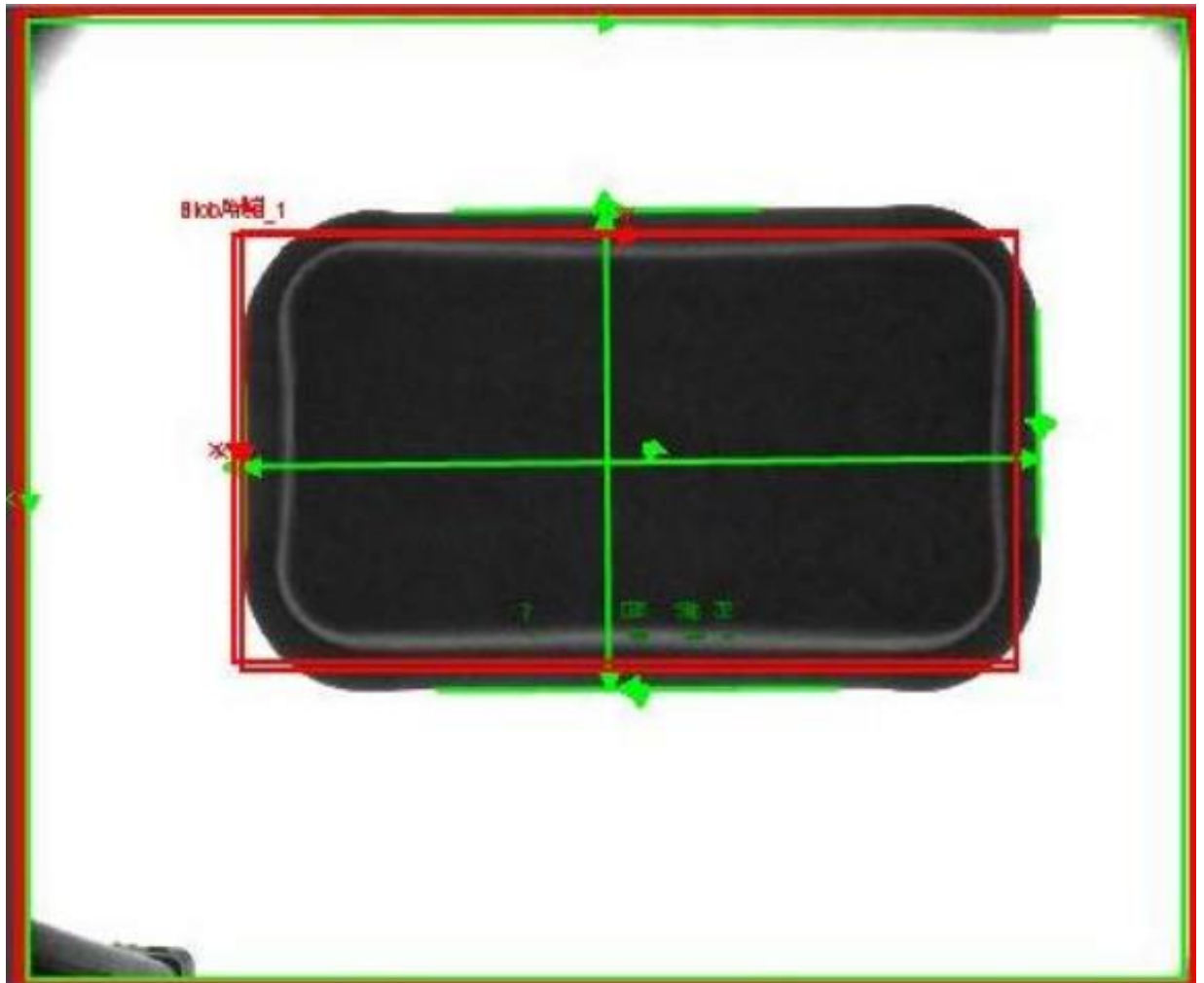
2.3.4 Kappaleen mittatarkkuuden tarkkailu

Koneistetun kappaleen mittatarkkuuden selvittäminen onnistuu automaattisesti konenäöllä tai koordinaattimittakoneella. Kompaktimpi näistä menetelmä on konenäkö. Konenäköjärjestelmä sisältää yleensä kameras, valaistuksen ja kuvankaappauskortilla varustetun tietokoneen ohjelmistoinen. Konenäön etuna on suuri tarkkuus, luotettavuus ja nopeus verrattuna ihmisen suorittamiin mittauksiin. Se ei myöskään väsy tarkastamiseen kuten ihminen. (Sarhaluoma 2006, s. 5) Konenäköprosessi sisältää yleisesti kolme eri vaihetta; kuvan hankinta, objektin asemointi sekä objektin tarkastelu ja mittaaminen. Konenäköä käytetään laadunvalvontaan esimerkiksi elintarvikkeissa, valmistetuissa osissa, piirilevyissä ja puuteollisuudessa. Konenäöllä voidaan tarkastaa geometrisia mittoja, pintojen virheitä ja tunnistaa muotoja tai objektin väri. (Davies 2012, s. 527 - 546)

Konenäköjärjestelmän suunnittelussa valaistus on erittäin tärkeä osa-alue. Valaistuksella korostetaan niitä osa-alueita, mistä kuvassa ollaan kiinnostuneita. Kuvasta on tärkeää saada pois kappaleen heijastukset ja varjot. Ennen kuvainformaation hyödyntämistä konenäköjärjestelmän ottamaa kuvaa esikäsitellään. Käytännössä kuvista poistetaan kohinaa ja ylimääräistä informaatiota sekä parannetaan kontrastia. (Sarhaluoma 2006, s. 8 - 14)

Kuvan esikäsitteilyn jälkeen kuvasta on mahdollisuus tunnistaa reunoja, kulmia, opetettuja malleja ja reikiä. Konenäöllä voidaan tarkastaa dimensioiden toleransseja

(kuva 9), muotojen oikeellisuutta, ruuvien ja jäysteen olemassaoloa, osan oikeaa asemointia ja pintojen naarmuja. Pintojen laadun tarkastaminen on monimutkaisempaa kuin etäisyyksien mittaaminen tai muotojen tunnistaminen, sillä valaistuksen saaminen tasaiseksi voi olla haasteellista. Muun muassa kaarevien pintojen aiheuttama epätasainen valaistus saatetaan tulkita pinnan virheeksi. (Davies 2012, s. 529 - 531)



KUVA 9. Kohteen mittojen tarkistus konenäköjärjestelmällä. (Leminen et al. 2013, s. 5)

2.3.5 Automaattisen solun ohjaus

Robotin ohjausjärjestelmän tehtäviä ovat ohjelmien tulkinta liikekäskyiksi, toimilaitteiden servo-ohjaus, sisäisen toiminnan tarkkailu eli itsediagnostiikka sekä ympäristön havainnointi antureiden avulla. Robottisovelluksissa järjestelmän keskusohjaus on yleensä joko yksikön tai kokonaisen solun ohjaus. Ohjaushierarkia toteutetaan tavallisesti master-slave-käsitteen mukaisesti niin, että robotti toimii

keskusohjauksen alaisuudessa slave-yksikkönä. Myös turvajärjestelmä on suunniteltava kiinteäksi osaksi automaatiojärjestelmää. Turvajärjestelmä valvoo koko solua, jolloin sen on oltava hierarkiassa muita laitteita ylempänä. Käytännössä yleensä robotti ohjaa kaikkia muita laitteita ja turvajärjestelmä on osa robotin ohjausta. Robotilta vedetään kaikille oheislaitteille ohjaus- ja hätäpysäytyssignaalit. Tärkeää on se, että poikkeustilanteissa järjestelmä pystyy tunnistamaan robotin tai oheislaitteen vian ja sulkemaan oheislaitteen ja robotin. (Aalto et al. 1999, s. 34, 112 - 114)

Robotti ja CNC-kone kommunikoivat tiedonsiirtoväylän avulla. Yleisesti käytettyjä väyliä ovat Profibus, Profinet, Ethernet, Interbus, DeviceNet tai I/O-kytkentä. (Cellro Automation 2019) CNC-koneen ja robotin yhteistoiminta toimii siten, että robotti suorittaa liikkeitä ohjelmoidusti ja ohjaa CNC-konetta ohjaussignaaleilla eli robotti käytännössä kutsuu työstökoneen NC-ohjelmaa tarvittaessa. Myös työstökoneen on mahdollista kutsua robottia suorittamaan liikkeitä ja tämä tapahtuu työstökoneen NC-ohjelmassa tietyllä M-koodilla. Työstökone jää odottamaan robotin lopetus-signaalia, jonka avulla työstökone tietää robotin liikkeiden olevan suoritettu. (Haas 2016, s. 9 - 10) Työstökoneen ja robotin kommunikointitavat poikkeavat hieman toisistaan riippuen työstökoneen ja robotin valmistajasta, mutta pääperiaate on sama. Robotin ja oheislaitteiden yhteistoiminnot vaiheistetaan tulo- ja lähtösignaaleilla siten, että liikkeet ja toiminnot tulevat suoritettua oikea-aikaisesti. Esimerkiksi CNC-kone odottaa konetta lastaavan robotin lähtösignaalia, jottei työstökoneen ovi sulkeudu silloin, kun robotin käsivarsi on vielä koneen sisällä. (Aalto et al. 1999, s. 112 - 114)

2.3.6 Tiedonsiirto automaattisessa solussa

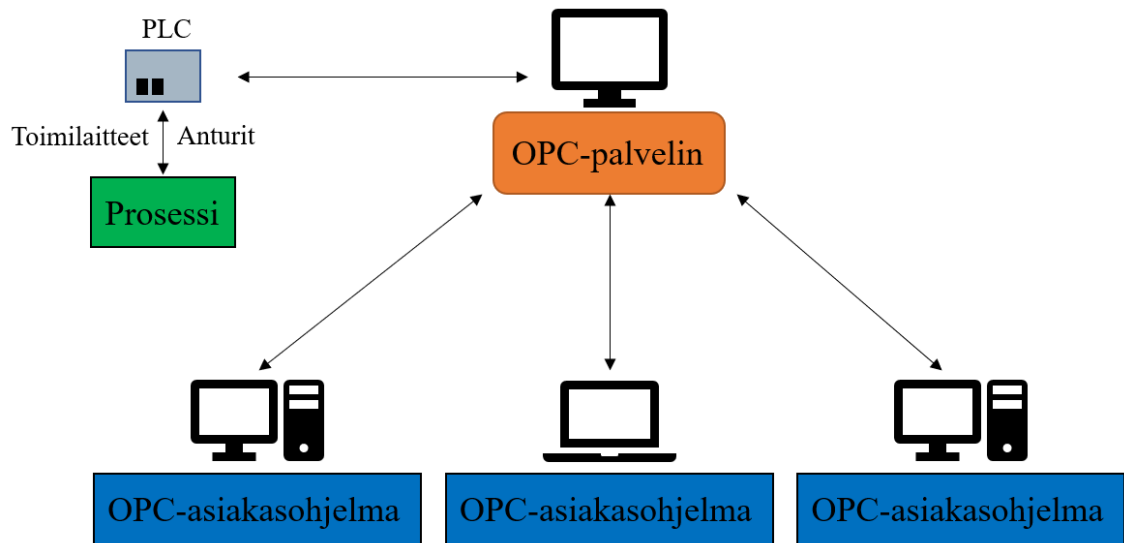
Kun suunnitellaan digital twin -konseptin hyödyntämistä automaattisessa koneistussolussa, on kerätyllä datalla suuri merkitys digital twinin toimimisen kannalta. Digital twin -mallia luodessa on päätettävä se, mitä tietoa halutaan kerätä ja miten tietoa halutaan hyödyntää solun toiminnassa. Eri valmistajien laitteiden välistä kommunikointia helpottavat tiedonsiirtostandardit kuten OPC UA ja MTConnect.

OPC eli Open Platform Communications on yhtenäinen ja turvallinen kommunikointistandardi, joka on suunniteltu teollisuusautomaation käyttöön. OPC-standardi julkaistiin vuonna 1996. Se on alustariippumaton ja se varmistaa saumattoman

tiedonkulun eri toimittajien laitteiden välillä. OPC-standardin hyötynä on se, että teollisuuden automaatio- ja prosessijärjestelmät voidaan yhdistää tuotantolaitoksen muiden järjestelmien kanssa. Standardin kehittämisestä ja ylläpidosta vastaa OPC-säätiö. (OPC Foundation 2017)

Aluksi OPC-standardi rajoittui vain Microsoft Windows -käyttöjärjestelmään ja tätä OPC:n ensimmäistä määrittelyä kutsutaan OPC Classiciksi. OPC Classic sisältää datan lukemisen ja kirjoittamisen, proseduurien valvonnan, hälytyksien lähettämisen ja pääsyn tallennettuun historialliseen prosessidataan. Näitä edellä mainittuja OPC Classicin spesifikaatioita kutsutaan termeillä OPC DA, OPC AE ja OPC HDA. Ajan mittaan syntyi tarve luoda uusi, alustariippumaton standardi. OPC Unified Architecture julkaistiin vuonna 2008 ja se ei perustunut enää Microsoftin tiedonsiirtoteknologiaan. OPC UA -standardi sisältää kaikki OPC Classicin spesifikaatiot ja se on taaksepäin yhteensopiva OPC Classicin kanssa. Tärkeimpänä erona uuden OPC UA:n ja OPC Classicin välillä on se, että OPC UA:ta voidaan käyttää Windowsin lisäksi sulautetuissa järjestelmissä, Linuxissa ja macOS-käyttöjärjestelmässä. (Arnarson 2019, s. 12; OPC Foundation 2019)

Kuten kuvasta 10 nähdään, OPC on asiakasohjelmaan (client) ja palvelimeen perustuva kommunikaatiotapa. Asiakasohjelmia ja palvelimia voi olla useita. OPC toimii siten, että asiakasohjelma määrittää mitä dataa ja milloin dataa pyydetään palvelimelta. OPC-palvelin ohjaa laitteita käyttäen asiakasohjelmien dataa ohjelmoitavan logiikan avulla. (Novotek) Øvern käytti diplomityössään OPC UA:ta seuraamaan erään KUKA-robotin moottoreiden nopeutta, vääntömomenttia, sähkövirtaa ja lämpötilaa. Øvern loi robottisolun Visual Components -ohjelmistolla ja sai OPC UA:n avulla välitettyä robotin dataa tietokoneelle. Tämä osoittaa sen, että digitaalisen kaksosen luominen robotin datansiirron osalta on mahdollista käyttäen OPC UA -kommunikointistandardia. (Øvern 2018, s. 57)



KUVA 10. OPC-kommunikointistandardin toiminta yksinkertaistettuna.

OPC UA -standardia on implementoitu laajasti monenlaisissa valmistuslaitteissa ja -järjestelmissä kommunikointiprotokollana. Silti OPC UA:n käyttäminen työstökoneissa ei ole vielä yleistä. Sekä OPC UA:ta että MTConnectia voidaan käyttää datan siirtoon cyberfyysisen työstökoneen eli työstökoneen digital twinin kehittämisessä. MTConnect on OPC:n kaltainen tiedonsiirtostandardi, jota lukuisat laitevalmistajat käyttävät työstökoneissa ja tuotantolaitteissa. Jotta koneistusprosesseja voidaan kattavasti esittää työstökoneen digital twinissä, tarvitaan työstökoneen sisäisiä antureita ja ulkoisia antureita. Reaaliaikaista koneistusdataa hankitaan esimerkiksi leikkuuvoimista, värähtelyistä, akustisesta emissiosta, karamoottorin tehosta ja se lähetetään esimerkiksi OPC UA palvelimelle. Tätä dataa analysoidaan ja työstökoneen digital twin hyödyntää sitä koneistusprosessin optimoinnissa. (Liu et al. s. 63 - 64)

2.4 Teorian synteesi

Digital twin on siis fyysisen järjestelmän tai prosessin 3D-malli, joka sisältää oikeiden antureiden dataa. Tämän työn teoriaosa kattoi teollisuusautomaation kehityksen, teollisuusrobotit, digitaalisen kaksosen sekä automaattisen koneistuksen teorian. Teollisuuden ja teollisuusautomaation siirtyminen internetiin on osa teollisuuden uutta vallankumousta eli Industry 4.0:ta. Osa Industry 4.0:aa on datan käyttäminen tuotantojärjestelmien suunnitteluun ja tuotekehityksen optimointiin. Dataa hyödyntävistä digitaalisista malleista sekä fyysisistä todellisuutta laajasti simuloivista malleista käytetään

nimitystä digital twin. Käsite digital twin ei ole yksiselitteinen, sillä käsitettä ei ole vielä standardisoitu.

Ensimmäinen tutkimuskysymys oli:

Mitä asioita on huomioitava, kun suunnitellaan manuaalisen koneistuksen automatisointia?

Tutkimuskysymyksen vastaus on seuraavanlainen. Aluksi on valittava sovellukseen parhaiten soveltuva kappaleita käsittelevä manipulaattori tai robotti ja selvitettävä työstökoneen ja robotin välinen tiedonsiirtotapa, jotta laitteet voivat toimia yhdessä. Laitteiden välinen tiedonsiirto on lähes aina mahdollista, mutta se vaatii usein hankintoja. Koneistettavat osat on hallittava niin, että niissä on samanlaisia piirteitä, jotta automaattinen tartunta ja kiinnittäminen on ylipäättään mahdollista. Koneistuksen automatisoinnissa täytyy myös huomioida kappaleiden kiinnitys koneistuksen aikana, kappaleiden syöttäminen automaattiseen järjestelmään, robotin tarttujan valinta, työstökoneen työkalunvalvonta ja valmistettavien kappaleiden laadunvalvonta. Solun automatisointi on investointina suuri ja siksi on hyvä tehdä laskelmia investoinnin takaisinmaksuajasta ja kannattavuudesta. Solun rakentamiseen ei ole yksiselitteisiä ratkaisuja, joten suunnittelussa on huomioitava monia asioita kuten osien vuotuiset valmistusmäärät, solun vaadittu joustavuustaso, solun laajennettavuus tuleville osille sekä henkilöstön osaamistaso solun ylläpitoon ja kehittämiseen.

3 NYKY- JA TAVOITETILA

Vetosauvojen valmistusprosessin nykytila konepajassa on se, että vetosauvat valmistetaan vesileikatuista aihioista CNC-jyrsinkoneella manuaalisesti ilman automaatiota. Monotoninen koneistusprosessi halutaan automatisoida siksi, että konepajan henkilöresursseja voidaan käyttää vaativimpien töiden suorittamiseen. Vetosauvojen valmistusmäärä on vuositasolla suuri, ja siksi yhden vetosauvan kappalehinta nousee tällä hetkellä turhan korkeaksi.

Automatisointiprojektin ajankohta on otollinen, sillä konepajalle hankitaan lähitulevaisuudessa uusi viisiakselinen työstökone. Uuden työstökoneen yhdistäminen robottiin on todennäköisesti helpompaa kuin vanhan jyrsinkoneen. Robotin ja työstökoneen yhteistoimintaa helpottaa myös uuden työstökoneen kyljessä oleva automaattinen ovi robotisoituun panostukseen ja purkuun. Konepajan nykytilanne on kaukana teollisuuden nykytilasta ja tutkitun teorian perusteella yksitoikkoisen konepalvelutehtävän automatisoiminen on järkevää. Kun automatisointitavoitteeksi rajataan vain vetosauvojen valmistus, ei automatisoinnilta tavoitella tällöin joustavuutta. Kohdeyrityksen tuottavuutta saadaan parannettua suuren volyymin tuotteella suhteellisen pienellä investoinnilla. Jos automaatioon haluttaisiin lisätä joustavuutta, täytyisi kohdeyrityksessä olla vuosittain paljon pieniä tuotantoeriä, jotta joustava valmistusjärjestelmä olisi kannattava ja perusteltu. Tässä tapauksessa on järkevää keskittyä yhden suuren volyymin tuotteen valmistuksen automatisointiin.

Robottisolun esisuunnittelun tarkoituksena on selvittää investointipäätöksen edellyttämät asiat ja se, miten tuotantotekninen ongelma tullaan ratkaisemaan. Esisuunnitteluvaihe päätetään yleensä myönteiseen tai kielteiseen päätökseen. Valmistettava sarja on hallittava niin, että tuotteet soveltuvat käsiteltäväksi ja työstettäväksi automaattisilla koneilla kuten roboteilla. Tässä työssä etuna on se, että vetosauvat ovat ulkomuodoltaan ja mitoiltaan samankaltaisia. Robotin valinnassa on huomioitava robotin ulottuvuus eri asennoissa, todellinen käsittelykyky, soveltuvuus suunniteltuun tehtävään, liikenopeuksien riittävyys sekä liitettävyyys oheislaitteisiin ja keskusohjaukseen. Tässä työssä käytetään yliopistolla olevaa KUKA KR150 R2700 -teollisuusrobottia. Sen kantokyky on 150 kg ja kääntösäde on n. 2 700 mm. Oletus on, että kyseinen robotti soveltuu kokonsa vuoksi hyvin tähän sovelluskohteeseen. Robotin kantokyky on paljon

suurempi kuin tarttujan ja siirrettävien osien massa, mutta suuren kääntösäteen vuoksi robotti soveltuu hyvin robotisoituun konepalvelutehtävään.

Tavoitetilä on se, että vetosauvojen valmistusprosessi saadaan toimimaan automaattisesti ja järjestelmä sisältää myös automaattisen mittatarkkuuden tarkastuksen. Tavoitetilä on myös se, että koneistussolusta luodaan digitaalinen kaksonen, joka kerää dataa valmistetuista osista ja solun toiminnasta. Automaattista koneistussolua voisi esitellä opiskelijoille esimerkkinä valmistuksen automatisoimisesta. Tavoitteena on lisäksi se, että automaattista valmistusta voisi laajentaa tarvittaessa myös muihin osiin käyttämällä hyväksi robottisolun osia ja robottiohjelman runkoa. Robotisointia voisi harjoitella esimerkiksi opiskelijaprojektissa.

Työn tutkimusmenetelmänä käytettiin tapaustutkimusta eli case-tutkimusta, joka on luonnollinen tapa tutkia ja kuvailla käytännön ongelmia. Valitusta tapauksesta pyrittiin tuottamaan yksityiskohtaista tietoa ja osoittamaan se, että tutkimuksen tuloksilla on yleistettävyyttä. Työn tuloksia voidaan hyödyntää aihetta sivuavissa projekteissa ja tulokset ovat yleistettävissä töihin, joissa suunnitellaan konepalvelun robotisointia.

4 TULOKSET

Automaattisen koneistussolun suunnittelussa huomioitiin seuraavia asioita:

- solun osat kuten ahiomakasiini, kiinnitin ja tarttuja ovat mahdollisimman yksinkertaisia ja modulaarisia, jolloin niihin on helppo tehdä muutoksia myöhemmin tarpeen mukaan
- solulla on mahdollisuus koneistaa eri mittaisia vetosauvoja
- turvallisuus – soluun tulee turva-aidat, turvaovi turvakytkimellä, hätäseis-painikkeet ja turva-aitojen ulkopuolelle kuittauskytkin.

Työn tuloksia ovat menetelmät ja osat, joilla manuaalinen koneistus saadaan automatisoitua sekä se, miten digitaalisen kaksosen konseptia voidaan hyödyntää koneistuksessa. Koska aiempaa dataa koneistusprosessista ei ollut, digital twiniä käytettiin tässä työssä tuotantojärjestelmän offline-ohjelmointiin ja sillä tehtiin käytännössä solun virtuaalinen käyttöönotto. Digital twinin avulla vältettiin tekemästä turhia hankintoja ja säästettiin robottiohjelmoinnin ajassa. Digital twiniä hyödynnettiin robotin liikeratojen tarkasteluun ja robotin sijaintia hienosäädettiin ohjelmoinnin aikana. Ilman digitaalisen kaksosen käyttämistä vaarana olisi ollut robotin sijoittaminen paikkaan, josta se ei ulotu konepalvelussa tarvittaviin paikkoihin. Lisäksi ohjelmointi oli turvallisempaa, kun sitä ei suoritettu robotin läheisyydessä. KUKA.Sim Pro -ohjelmistolla luotu robottiohjelma voidaan siirtää oikealle KUKA-robotille. Tämä mahdollistaa solun nopean käyttöönoton, koska robotin liikkeet ja I/O-signaalit on luotu offline-ohjelmoinnilla.

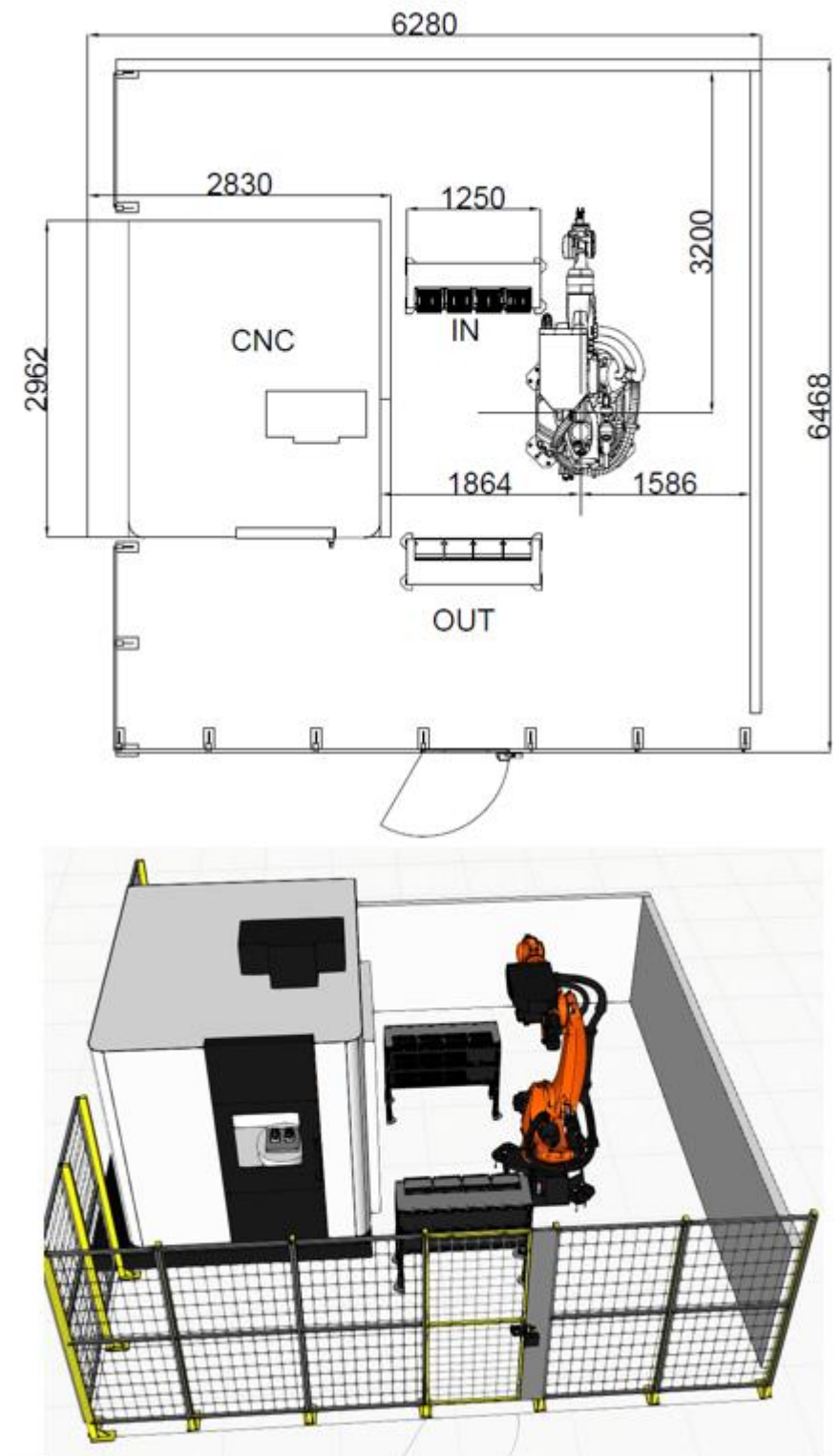
Tuloksena suositellaan, että konepaja käyttää automaattisessa koneistussolussa työkalunvalvontajärjestelmää, joka tunnistaa terärikot ja terän kuluneisuuden. Koneistuskeskuksen on vaihdettava työkalua, kun se katkeaa tai on kulunut liikaa, jotta työkappaleiden mittatarkkuus pysyy hyvänä. Koneistettujen kappaleiden mittatarkkuuden seurantaan suositellaan konenäköjärjestelmää. Se voidaan integroida pienen kokonsa vuoksi koneistussolun sisälle. Kappaleiden muotojen ja mittojen yksinkertaisuuden vuoksi konenäköön perustuvan laadunvalvonnan suurimpana haasteena on luultavasti valaistuksen saaminen mittaukselle sopivaksi. Koordinaattimittakoneeseen perustuva laadunvalvonta vaatisi suuren tilan ja se ei mahdu

tällä hetkellä robottisolun ympäristön lähelle. Tällöin vetosauvoille tarvittaisiin kuljetusjärjestelmä kuten vihivaunu.

Kun automaattinen koneistussolu saadaan rakennettua, digital twiniä voisi jatkossa laajentaa työstökoneen ja robotin datan keräämiseen. Dataa työstökoneen ja robotin toiminnasta saa hankittua käyttämällä yhtenäistä kommunikointistandardia kuten OPC UA:ta tai MTConnectia. Digital twinillä seurattavia kiinnostavia asioita voisivat olla valmistettujen kappaleiden mitat ja määrät, terän kulumisen historiadata, saavutettu mittatarkkuus, virhetilanteet ja robotin kunto ja akseleiden lämpötilat. Näiden tietojen keräämiseen olisi hyvä rakentaa selkeä käyttöliittymä, jotta raakadata saadaan käyttäjäystävälliseen muotoon. Kun digital twiniin saadaan dataa, sitä voisi käyttää kappaleiden mittatarkkuuden parantamiseen, terien tehokkaampaan käyttöön ja huoltojen ennakointiin. Digital twinin avulla voisi selvittää sen, voiko koneistusta tehostaa jotenkin tai tunnistaa ne merkit, jolloin terä täytyy vaihtaa hyvän mittatarkkuuden ylläpitämiseksi. Digitaalisen kaksosen avulla voisi saada lisäksi viitteitä esimerkiksi siitä, jos jokin robotin tietty liikerata kuormittaa robotin akseleita tarpeettomasti.

Tämä työ toimii konepajalle hyvänä pohjana robotisoidun konepalvelun laajentamiseen myös muille kappaleille kuin vetosauvoille. Robotin sekvenssikaaviota (liite 1) ja luotua robottiohjelmaa voidaan käyttää pohjana muiden kappaleiden valmistamisen automatisointiin. Etuna on se, ettei uutta robottiohjelmaa tarvitse luoda tyhjästä. Robottiohjelmassa muutettavia osia ovat ainoastaan makasiinien sijainnit, kappalespesifit liikeradat sekä CNC-koneen käyttämä NC-ohjelma.

Suuri osa diplomityön tulosta on automaattisesta koneistussolusta luotu simulaatio. Simulaatio tehtiin KUKA.Sim Pro -ohjelmistolla, joka on KUKA-roboteille räätälöity versio Visual Components -ohjelmasta. Ohjelmisto on luotu tuotantojärjestelmien suunnitteluun ja robottien simulointiin. KUKA.Sim Pron avulla validoitiin tarttujan, makasiinin ja kiinnityksen toimivuus vetosauvojen valmistuksen automatisoinnissa. Lisäksi ohjelmiston avulla selvitettiin robotin ulottuvuus haluttuihin asemiin ja päätettiin optimaalinen sijainti robotille todellisessa tuotantoympäristössä. Koneistussolun layout ja 3D-malli on esitetty kuvassa 11. Kaikki osat pois lukien robotti ja turva-aidat on mallinnettu itse Autodesk Inventorilla.



KUVA 11. Automaattisen koneistussolun layout ja 3D-malli.

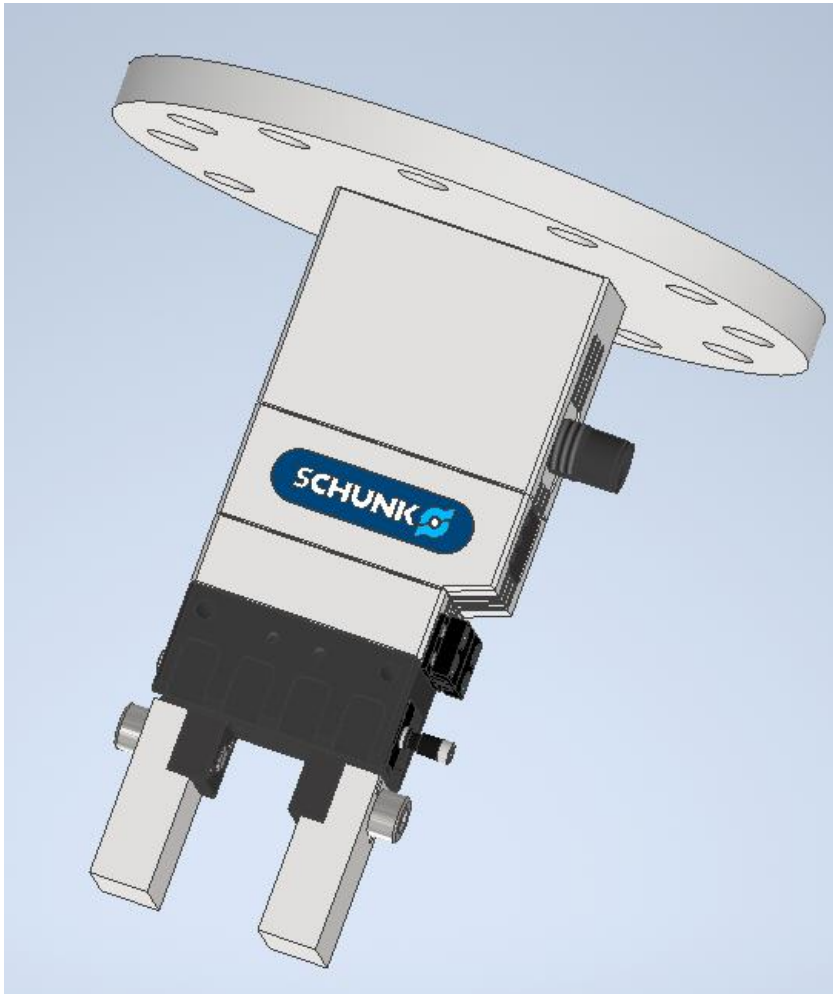
Diplomityön tekohetkellä robottisoluun tulevaa koneistuskeskusta ei ole vielä hankittu. Koneistuskeskus tulee olemaan viisiakselinen pystykarainen työstökone ja sen tekniset ominaisuudet ovat pääosin selvät. Työstökoneen sivulla olevaa automaattista ovea

käytetään työkappaleiden panostamiseen ja purkuun robotin avulla. Työstökoneen etuovea voidaan käyttää manuaaliseen koneistukseen robotin ollessa suljettuna. Kuvasta 11 ilmenevää robotin sijaintia määritti pitkälti se, että uuden koneistuskeskuksen sijainti oli lukittu vahvistetun betonilattian alueelle.

Robottisimuloinnin luontia varten robottiohjelman rakenteesta tehtiin selventävä sekvenssikaavio (liite 1). Robotin ohjelmoinnissa hyödynnettiin aliohjelmia makasiinien ja koneistuskeskuksen panostamisen ja purkamisen kutsumisessa. Aliohjelmien avulla muutosten tekeminen ohjelman kulkuun on helpompaa. Muutoksia voidaan tarvita siinä vaiheessa, kun robotin liikkeitä tarkastetaan todellisessa tuotantoympäristössä. Aihiomakasiinissa ja valmiiden kappaleiden makasiinissa tapahtuvien liikkeiden ohjelmointi tehtiin käyttämällä paletointia. Jokainen makasiinin yksittäinen paletti käsiteltiin omalla koordinaatistollaan. Kun robotti on suorittanut yhden koneistuskierron, muuttaa ohjelma paletin koordinaatistoa seuraavan aihion kohdalle. Robotin tyhjentäessä aihiomakasiinin yhden paletin se siirtyy poimimaan aihioita seuraavasta paletista. Video robottisimulaatiosta on esitetty liitteessä 2.

4.1 Automaattisen koneistussolun tekniset ratkaisut

Automaattiseen koneistussoluun robotin tarttujaksi valittiin sähköisesti ohjattava kaksisormitarttuja Schunk EGP 50-N-N-IOL, johon leuat ja kiinnityslaippa valmistetaan itse (kuva 12). Tarttujan valintaan vaikuttivat tarttujan pieni koko, tartunnan toistotarkkuus, nopea avaus- ja sulkemisnopeus sekä leukojen vaihtomahdollisuus. Kyseisen tarttujan tartunnan toistotarkkuus on 0,02 mm (Schunk 2020). Robotti ohjaa tarttujaa I/O-signaaleilla. Tällöin tarttuja on joko täysin auki tai täysin kiinni, ja tartunta voidaan tehdä vain tietyn kokoisille kappaleille. Tämä ei ole ongelma, sillä vetosauvoista koneistetaan vain uumaosa ja tartunta suoritetaan vetosauvan päästä. Jos tartuttavan kappaleen mitat muuttuvat tai robottia halutaan käyttää toisessa tehtävässä, voidaan tarttujan leuat vaihtaa uusille kappaleille sopivaksi.



KUVA 12. Valittu robottitarttuja, leuat ja kiinnityslaippa. (Schunk 2020)

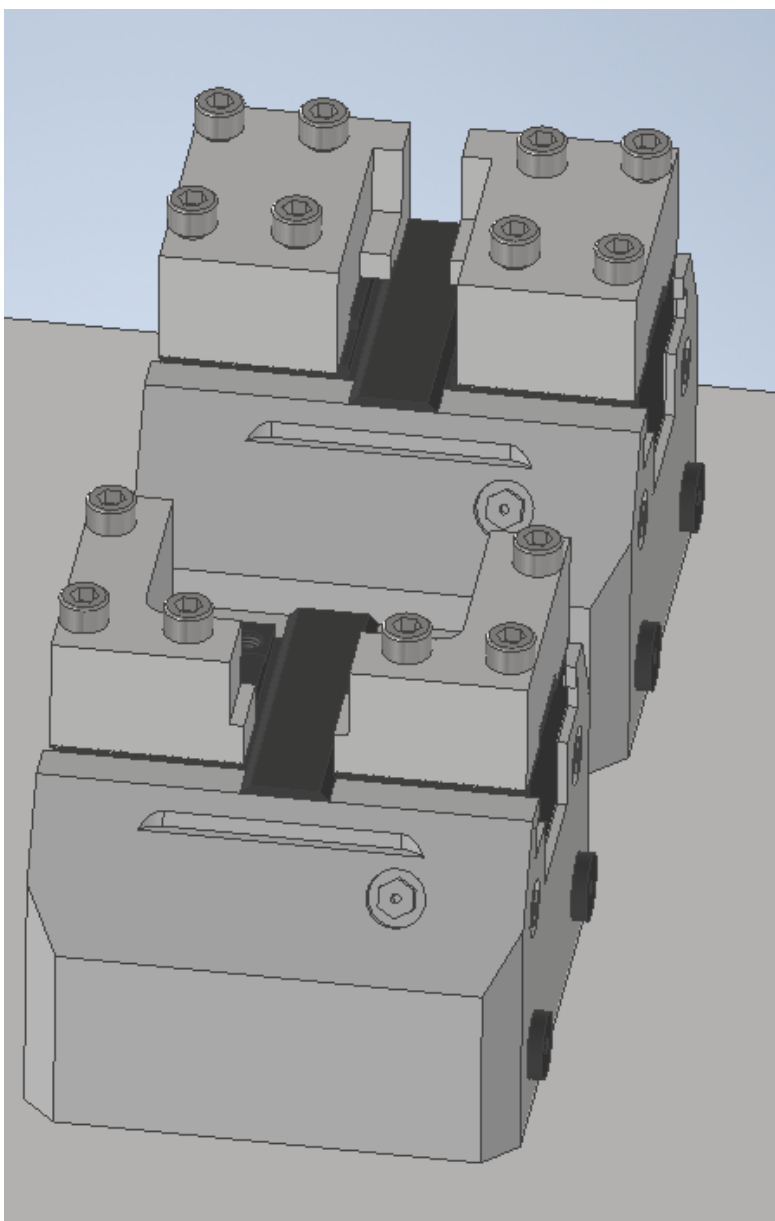
Kyseisen tarttujan tartuntavoiman riittävyys tähän sovellukseen tarkastettiin yhtälöllä (1). (Festo 2006, s. 4)

$$F_G = \frac{m \cdot (g + a)}{2 \cdot \mu} \cdot S, \quad (1)$$

missä F_G on vaadittava tartuntavoima [N],
 m on tartuttavan kappaleen massa [kg],
 $g = 9,81$ [m/s²],
 a on tarttujan kiihtyvyys [m/s²],
 μ on tarttujan ja kappaleen välinen kitkakerroin ja
 S on varmuuskerroin.

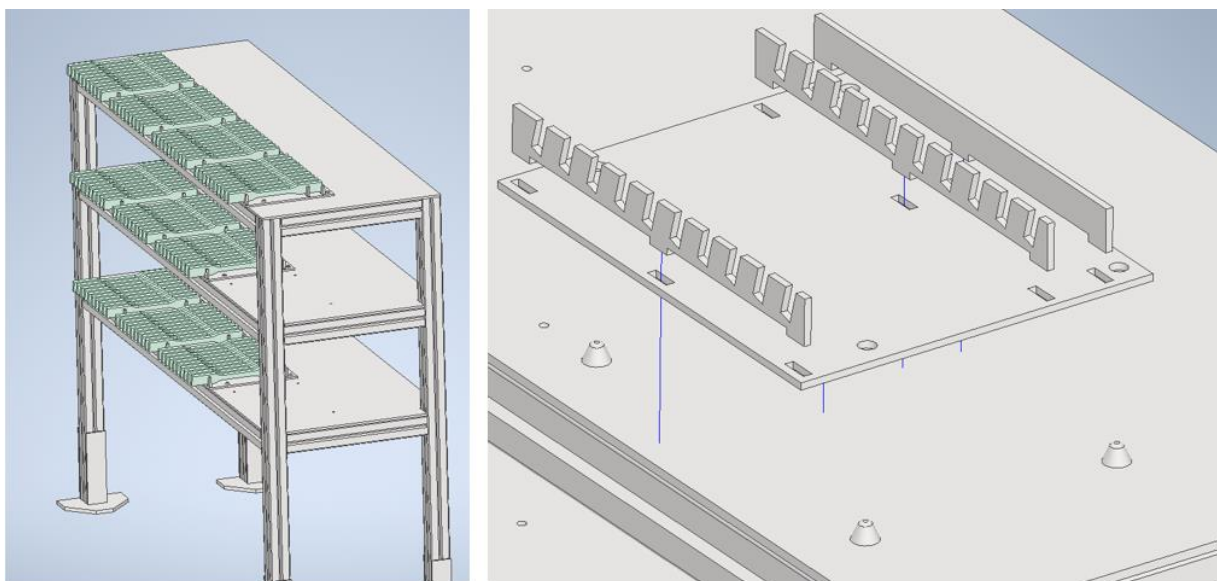
Koneistussolun työstökoneessa työkappaleen kiinnittimiksi valittiin kaksi hydraulista Schunk KSH plus 100 -kiinnitintä (kuva 13). Hydraulikka kiinnittimien käyttövoimaksi

valittiin siksi, koska hankittavan koneistuskeskuksen pöydässä on hydrauliportit ja on johdonmukaista käyttää niitä. Lisäksi teoria osoitti hydraulisten kiinnittimien olevan hyviä ratkaisuja automaattiseen toimintaan ja hydraulisilla kiinnittimillä saadaan aikaan suuri kiinnitysvoima. Kiinnittimien ohjauskäskyt voidaan antaa työstökoneen M-koodeilla. Kiinnittimet on valmistajan toimesta suunniteltu automaatiota varten ja niiden muoto on sellainen, että niihin jää mahdollisimman vähän lastuja. Lastujen poistoon suositellaan karan läpi tehtävää paineilmapuhallusta koneistuksen jälkeen ja ennen uuden kappaleen kiinnitystä. Kiinnittimen leuat ovat vaihdettavissa ja ne on tällä hetkellä suunniteltu siten, että ne paikoittavat vetosauvat leukojen väliin.



KUVA 13. Koneistussoluun valittu automaattinen kiinnitysratkaisu. (Schunk 2019)

Koneistussolun ahiomakasiinin makasiinityypiksi valittiin palettimakasiini, jonka runko rakentuu alumiiniprofiilista. Koska robottisolun vaatimuksena oli mahdollisuus koneistaa eripaksuisia vetosauvoja, suunniteltiin makasiinilevyt kuvan 14 mukaisesti niin, että ne voidaan helposti vaihtaa eripaksuisille sauvoille. Makasiinilevyissä on sopiva vällys ja pieni kallistus, jotta ahiot paikoittuvat tiettyyn asemaan, josta robotti löytää aihion. Tasoihin suunniteltiin paikoitusnastat, joiden päälle paletit asetetaan. Paikoitusnastojen vuoksi makasiiniin on nopeaa laittaa erilaisia yhdistelmiä vetosauva-aihioista.



KUVA 14. Koneistussoluun suunniteltu ahiomakasiini.

Kuvassa 11 näkyvään koneistussoluun olisi voitu valita makasiinityypiksi myös kuljetin. Tällöin ahiot ja valmiit kappaleet tuotaisiin soluun kuljetinta pitkin ja robotin käsivarteen tarvittaisiin konenäkökamera tunnistamaan kappaleiden sijainti kuljettimen päällä. Kuljetinmakasiiniin ei päädytty siksi, koska valinta olisi tuonut soluun monimutkaisuutta konenäön ja kuljettimien myötä. Vetosauvojen vuosittainen valmistusmäärä ei ole niin suuri, että investointi olisi ollut perusteltu. Lisäksi työn tilaajan toiveena oli se, että valmiit vetosauvat olisivat samassa tunnetussa järjestyksessä kuin ne ovat ahiomakasiinissa. Kuljetinratkaisussa tämänlaisen järjestyksen ylläpitäminen olisi vaikeampaa.

5 YHTEENVETO

Työn kirjoittamishetkellä digital twiniin pohjautuvat alustat ovat saatavilla, mutta samalla myös jatkuvan kehityksen alla. Teknologialle on luonteenomaista se, ettei sitä hankita vain suoraan kaupan hyllyltä. Digital twin -teknologia vaatii yrityksiltä paljon perehtymistä, investointeja sekä yhteistyötä järjestelmätoimittajien kanssa. Kuten työssä on mainittu, virtuaalijärjestelmien luominen on kallista ja monimutkaista ja teknologia on edennyt tähän mennessä vain suurten yritysten johdolla. On myös huomioitava se, että pelkkä digitalisoiminen ei auta yrityksiä menestymään, sillä se on pelkkä työkalu asioiden analysointiin ja kehittämiseen. Lisäksi yrityksiltä vaaditaan yhä osaamista toimialalta ja tekniikasta.

Diplomityön suorittaminen meni hyvin ja alussa määriteltyihin tutkimuksen tavoitteisiin päästiin. Työn aikana epäselväksi jäi työkalunvalvontajärjestelmä ja robotin ohjauksen käyttöliittymä. Tutkimuksessa ei selvinnyt se, kuinka helppoa työkalunvalvontajärjestelmä on integroida automaattiseen soluun vai sisältääkö jopa uusi työstökone valmiiksi toimintoja työkalunvalvontaan. Epävarmaksi jäi myös se, että millaisella käyttöliittymällä automaattista solua käytännössä ohjataan ja miten tiedot erilaisista työstettävistä aihioista syötetään robotille.

Jos uusi työstökone ja robotti olisivat olleet valmiina konepajan lattialla diplomityön suorituksen aikana, työtä olisi ollut mielenkiintoista jatkaa ajamalla automaattista koneistussolua käytännössä. Ongelmakohtia olisi voinut ratkaista vielä työn aikana ja samalla olisi nähnyt ratkaisut, jotka toimivat kuten oli suunniteltu. Kun automaattinen koneistussolu saadaan toimintakuntoon, työtä on mahdollisuus jatkaa luomalla konepajalle koneistussolun digital twin, joka sisältää yhteyden koneistuskeskukseen ja robottiin sekä datan keräämisen. Tämän tekeminen ei varmasti ole mutkatonta ja asian suunnittelu vaatii yhteistyötä järjestelmätoimittajien kanssa.

LÄHDELUETTELO

Aalto, H., Heilala, J., Hirvelä, T., Kuivanen, R., Laitinen, M., Lehtinen, H., Lempiäinen, J., Lylynoja, A., Renfors, J., Selin, K., Siintoharju, T., Temmes, J., Tuovila, T., Veikkolainen, M., Vihinen, J., Virtanen, A., 1999. Robotiikka. Vantaa: Talentum Oyj/MetalliTekniikka, 186 s. ISBN 951-9438-58-0

Aaltonen, K., Ihalainen, E., 1995. Valmistustekniikka. Jyväskylä: Otatieto, 490 s. ISBN 951-672-205-9

Aaltonen, K., Torvinen, S., 1997. Konepaja-automaatio. Porvoo: WSOY, 309 s. ISBN 951-0-21439-6

Arnarson Halldor, 2019. Digital twin simulation with Visual Components [diplomityö]. UiT The Arctic University of Norway. 85 s.

Automaatioväylä, 2018. DIGITAALINEN ERIPAINOS 2018 • AUTOMAATION HISTORIA, NYKYTILA JA TULEVAISUUS [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.automaatioseura.fi/site/assets/files/1380/automaatio_ennen_nyt_ja_tulevais_uudessa_av_artikkelisarja_2018.pdf [viitattu 25.5.2020].

Automaatioväylä, 2019. Automaatioväylä 042019 [verkkolehti]. Automaatioväylä Oy. 27 s.

Biesinger, F., Meike, D., Kraß, B., Weyrich, M., 2018. A Case Study for a Digital Twin of Body-in-White Production Systems General Concept for Automated Updating of Planning Projects in the Digital Factory. ResearchGate. 9 s.

Cellro Automation 2019. Can I use a loading robot with my machine? [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://cellro.com/en/knowledgebase/loading-robot-with-my-machine> [viitattu 7.8.2020].

Davies Edward, 2012. Computer and machine vision : theory, algorithms, practicalities. Elsevier, 912 s. ISBN 978-0-12-386908-1

Encyclopedia.com, 2020. Weaving Machinery [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.encyclopedia.com/fashion/encyclopedias-almanacs-transcripts-and-maps/weaving-machinery> [viitattu 4.8.2020].

Felix Chris, 2007. Handling Parts In A Robotic Cell [verkkodokumentti]. Production machining. Saatavissa: <https://www.productionmachining.com/articles/handling-parts-in-a-robotic-cell> [viitattu 20.8.2020].

Festo, 2006. Standard grippers HGP/HGD/HGR/HGW Micro grippers HGPM/HGWM [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/26905/info_116_en.pdf [viitattu 25.8.2020].

Gartner, 2017. Top Trends in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2017 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-in-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2017> [viitattu 3.8.2020].

Gartner, 2019. Gartner Survey Reveals Digital Twins Are Entering Mainstream Use [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-02-20-gartner-survey-reveals-digital-twins-are-entering-mainstream> [viitattu 28.8.2020].

Glaessgen, E., Stargel, D., 2012. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 14 s.

Grieves Michael, 2016. Origins of the Digital Twin Concept. ResearchGate. 8 s.

Haas, 2016. Overview - Robot Ready Interface [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://staging-diy.haascnc.com/printpdf/reference-docs/overview-robot-ready-interface> [viitattu 7.8.2020].

Heinonen Miikka, 2019. Digital twin konseptina ja sen käyttömahdollisuudet teollisuudessa [kandidaatintyö]. Tampere: Tampereen yliopisto. 35 s.

IBM, 2017. Creating a building's 'digital twin' [verkkodokumentti]. Wired Brand Lab. Saatavissa: <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/creating-buildings-digital-twin> [viitattu 8.6.2020].

International Federation of Robotics, 2019. Executive Summary World Robotics 2019 Industrial Robots [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://ifr.org/downloads/press2018/Executive%20Summary%20WR%202019%20Industrial%20Robots.pdf> [viitattu 16.6.2020].

Ismail Nick, 2019. Gartner: digital twins beginning to enter the mainstream [verkkodokumentti]. Information Age. Saatavissa: <https://www.information-age.com/gartner-digital-twins-123479330> [viitattu 22.5.2020].

Javanmiri Azad, 2011. Kokoonpanorobotisointi konepajateollisuudessa [kandidaatintyö]. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 34 s.

Keränen Matti, 2019. Datavirtaa päästä päähän – näin käy, kun Tornion terästehdas digitalisoidaan kymmenillä miljoonilla euroilla [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/datavirtaa-paasta-paahan-nain-kay-kun-tornion-terastehdas-digitalisoidaan-kymmenilla-miljoonilla-euroilla/cfd49eba-a6b4-34fb-ace5-9f788bc21b4e> [viitattu 27.5.2020].

KONE Oyj 2017. KONE mullistaa hissien kunnossapidon uusilla räätälöitävillä KONE Care™ -palveluilla ja älykkäillä 24/7 Connected Services -palveluilla [lehdistötiedote]. Saatavissa: <https://www.kone.fi/tietoa-meista/kone-yrityksena/lehdistotiedotteet/KONE-mullistaa-hissien-kunnossapidon-uusilla-raataloitavilla-KONE-Care-palveluilla-ja-alykkailla-24-7-Connected-Services-palveluilla.aspx> [viitattu 27.5.2020].

KUKA - Robots & Automation, 2016. Flexible and Portable Robotic Machine Tending Solution [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=kXK5bRnRrWo> [viitattu 20.8.2020].

Lamarre Steve, 2010. Robotic Automation's Challenges, Solutions and Benefits [verkkodokumentti]. Production machining. Saatavissa:

<https://www.productionmachining.com/articles/robotic-automations-challenges-solutions-and-benefits> [viitattu 20.8.2020].

Lappalainen Elina, 2018. Koneet saivat kaksosen, jonka avulla tuotekehitysaika lyhenee [video]. Talouselämä. Saatavissa: <https://www.talouselama.fi/uutiset/koneet-saivat-kaksosen-jonka-avulla-tuotekehitysaika-lyhenee/71141606-0c6a-3869-bdc5-24957efc9792> [viitattu 23.5.2020].

Latokartano Jyrki, 2017. Teollisuusrobottitilastot 2017. Suomen Robotiikkayhdistys Ry. 13 s.

Leminen, V., Kainusalmi, M., Tanninen, P., Lindell, H., Varis, J., Ovaska, S-S., Backfolk, K., Pitkänen, M., Sipiläinen-Malm, T., Hartman, J., Rusko, E., Hakola, L., Ihalainen, P., Määttänen, A., Sarfraz, J., Peltonen, J., 2013. Aspects on Packaging Safety and Biomaterials. ResearchGate. 12 s.

Liljamo Juho, 2017. Yhteistoiminnallisen robotin integraatioprosessi valmistavassa teollisuudessa [opinnäytetyö]. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu. 70 s.

Liu, C., Vengayil, H., Lu, Y., Xu, X., 2019. A Cyber-Physical Machine Tools Platform using OPC UA and MTConnect. Journal of Manufacturing Systems. S. 61-74.

Lättilä, T., Upla, J., Salonen, N., 2017. Keinotodellisuuden hyödyntäminen liikenne- ja viestintäministeriön toimialalla. Liikenne- ja viestintäministeriö. 78 s.

Makris, S., Michalos, G., Chryssolouris, G., 2012. Virtual Commissioning of an Assembly Cell with Cooperating Robots. Kreikka: University of Patras. 11 s.

Malik, A., Andersen, M., Bilberg, A., 2019. Advances in machine vision for flexible feeding of assembly parts. Procedia Manufacturing. S. 1228-1235.

Mitsubishi Electric Germany, 2020. Handling robots for efficient forklift add-on parts production [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://en.developmentscout.com/industrie/automatisierung/roboter/11226-handlingroboter-mitsubishi-electric-durwen-gabelstapler-anbauteile> [viitattu 14.9.2020].

Montague Jim, 2015. Digital Twins elevate industrial asset performance [verkkodokumentti]. Control Global. Saatavissa: <https://www.controlglobal.com/articles/2015/ge-show9> [viitattu 27.5.2020].

Novotek. OPC and OPC UA explained [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.novotek.com/uk/solutions/kepware-communication-platform/opc-and-opc-ua-explained> [viitattu 1.9.2020].

OPC Foundation, 2017. What is OPC? [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://opcfoundation.org/about/what-is-opc> [viitattu 26.8.2020].

OPC Foundation, 2019. Unified Architecture [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua> [viitattu 26.8.2020].

Oravasaari Tuomo, 2018. Robottikäyttäjien kouluttaminen konepalveluun – Koulutuspalvelun kehittäminen Yaskawa Finland Oy:ssä [opinnäytetyö]. Turku: Turun ammattikorkeakoulu. 52 s.

Pervilä Markku, 2019. Digitaaliset kaksoset ovat it:ssä nyt kuuminta uutta [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.tivi.fi/uutiset/digitaaliset-kaksoset-ovat-itssa-nyt-kuuminta-uutta/40f1f3c3-0fe7-3825-b22b-418cc028f990> [viitattu 8.6.2020].

Probst Emily, 2014. Robot Eliminates WIP, Improves Efficiency [verkkodokumentti]. Modern Machine Shop. Saatavissa: <https://www.mmsonline.com/articles/robot-eliminates-wip-improves-efficiency> [viitattu 25.8.2020].

Reunanen Tero, 2011. Nollapistekiinnitysteknologioiden soveltaminen ja robotisoitu panostus. Turku: Turun ammattikorkeakoulu, 160 s. ISBN 978-952-216-191-8

Ridal Marko, 2019. Digitaalisen kaksosen hyödyt teknologiateollisuudessa [opinnäytetyö]. Lappeenranta: Saimaan ammattikorkeakoulu. 27 s.

RNA Automation, 2020. Bowl Feeders [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.rnaautomation.com/products/feeding-and-handling/bowl-feeders> [viitattu 25.8.2020].

RobotWorx. Machine Tending Robots [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.robots.com/applications/machine-tending> [viitattu 29.8.2020].

Sarhaluoma Jarno, 2006. Roottori- ja staattorilevyjen laaduntarkastus konenäöllä [opinnäytetyö]. Kajaani: Kajaanin ammattikorkeakoulu. 47 s.

Schunk, 2019. KSH plus 100 [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://schunk.com/de_en/clamping-technology/product/18407-0405230-ksh-plus-100 [viitattu 14.9.2020].

Schunk, 2020. EGP 50-N-N-IOL [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://schunk.com/de_en/gripping-systems/product/69984-1383538-egp-50-n-n-iol [viitattu 14.9.2020].

Shaw, K., Fruhlinger, J., 2019. What is a digital twin and why it's important to IoT [artikkeli]. Saatavissa: <https://www.networkworld.com/article/3280225/what-is-digital-twin-technology-and-why-it-matters.html> [viitattu 20.5.2020].

Tao, F., Zhang, M., 2017. Digital Twin Shop-floor: A New Shop-floor Paradigm towards Smart Manufacturing. ResearchGate. 11 s.

Tuunanen Tommi, 2014. Teollisuusrobotin käyttöönotto ja ohjelmointi [opinnäytetyö]. Mikkeli: Mikkelin ammattikorkeakoulu. 100 s.

Valonen Aleks, 2012. Robottijärjestelmän hankintaselvitys automaattisorvaamoon [opinnäytetyö]. Satakunnan ammattikorkeakoulu. 44 s.

Ventä, O., Honkatukia, J., Häkkinen, K., Kettunen, O., Niemelä, M., Airaksinen, M., Vainio, T., 2018. Robotisaation ja automatisaation vaikutukset Suomen kansantalouteen 2030. Valtioneuvoston kanslia. 93 s.

Wihuri Oy Tekninen Kauppa. Teollisuusrobotit [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.tekninenkauppa.fi/tuoteryhmat/tyostokoneet/tyostokoneautomaatio-ja-ohjelmistot/teollisuusrobotit> [viitattu 29.8.2020].

Zhang, J., Fang, X., 2016. Challenges and key technologies in robotic cell layout design and optimization. Journal of Mechanical Engineering Science. S. 2912-2924.

Øvern Aksel, 2018. Industry 4.0 - Digital Twins and OPC UA [diplomityö]. Norwegian University of Science and Technology. 173 s.

Liite 1. Robottiohjelman sekvenssikaavio.

Selitykset:

CNC Työstökone
Kuka Teollisuusrobotin ohjaus
KukaGrip Robotin tarttujan toiminto

CNC Valmistelevat G-koodit
CNC Työkalut 0-pisteeseen
CNC Kiinnittimen leuat auki
CNC Oven avaaminen
CNC Robotin kutsu
KukaGrip Tarttujan leuat auki
Kuka Robotti kotiasemaan

Kuka	Liike input-makasiiniin
KukaGrip	Tarttujan sulkeminen
KukaGrip	Anturitieto tartunnasta
Kuka	Liike työstökoneelle
Kuka	Sauvan asetus kiinnittimeen
Kuka	Työstökoneen kutsu
CNC	Kiinnittimen leukojen sulkeminen
CNC	Anturitieto leukojen sulkemisesta
CNC	Robotin kutsu
KukaGrip	Tarttujan avaaminen
KukaGrip	Anturitieto tarttujan avautumisesta
Kuka	Liike työstökoneen ulkopuolelle
Kuka	Työstökoneen kutsu
CNC	Oven sulkeminen
CNC	Cycle start
CNC	Työstöoperaatioiden suoritus
CNC	Oven avaaminen
CNC	CNC valmis, robotin kutsu
Kuka	Liike työstökoneen sisäpuolelle
KukaGrip	Tarttujan sulkeminen
KukaGrip	Anturitieto tartunnasta
Kuka	Työstökoneen kutsu
CNC	Kiinnittimen leukojen avaaminen
CNC	Anturitieto leukojen avaamisesta
CNC	Robotin kutsu
Kuka	Liike työstökoneen ulkopuolelle
Kuka	Liike output-makasiiniin
KukaGrip	Tarttujan avaaminen
KukaGrip	Anturitieto tarttujan avautumisesta
Kuka	Liike väliasemaan
Kuka	Paletin koordinaatiston muutos

Kuka Makasiinin paletit tyhjiä
Kuka Robotti kotiasemaan
Kuka Työstökoneen kutsu
CNC Työkalut 0-pisteeseen

Liite 2. Automaattisen koneistussolun simulaatio.

Videon linkki: <https://youtu.be/YCe4diqwR5U>